



POLITÉCNICA

Francisco Iván Rodríguez López

Representación 3D de petroglifos: propuesta de metodología de modelización de los grabados del Valle de Tamanart, Marruecos

Trabajo fin de Máster
Máster en Ingeniería Geodésica y Cartográfica

Tutora : Prof. Dra. Mercedes Farjas Abadía, E.T.S.I. en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid

Julio, 2014



Escuela Técnica Superior de Ingenieros en TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

Representación 3D de petroglifos: propuesta de metodología de modelización de los grabados del Valle de Tamanart, Marruecos

Copyright © Francisco Iván Rodríguez López, ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid

La ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía y la Universidad Politécnica de Madrid tienen el derecho, perpétuo y sin límites geográficos, de archivar y publicar este trabajo a través de ejemplares impresos reproducidos en papel o de forma digital, o por cualquier otro medio conocido o que venga a ser inventado, y de divulgar a través de repositorios científicos y de admitir su copia y distribución con objetivos educacionales o de investigación, no comerciales, a condición de dar crédito a su autor y editor.

A mis padres

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer la paciencia, dedicación y soporte que me ha brindado durante estos meses mi Tutora en este Trabajo Fin de Máster, Mercedes Farjas, sin todo ese apoyo hubiese sido imposible realizar este trabajo.

Gracias a los profesores, compañeros y todas las personas con las que he tenido el placer de coincidir a lo largo del máster en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía.

También me gustaría mencionar el apoyo recibido por parte del Museo Arqueológico Nacional y los responsables del Departamento de Prehistoria que me dieron la oportunidad de realizar la toma de datos en sus magníficas instalaciones. A Enrique Couceiro por la pieza de laboratorio y a los responsables del Proyecto Tamanart.

Mi tiempo en Madrid tampoco hubiese sido el mismo sin las amistades que he conocido en esta ciudad: Marcos, Javi, Diego, Vero, David, Sergio, Ángel, Paco,... gracias por tantos ratos compartidos en el tatami y fuera de él, gracias por estar ahí en los buenos y en los malos momentos ayudándome siempre.

Finalmente, debo acordarme de mis padres y el resto de mi familia en Lugo, que me han apoyado durante toda mi vida y con los que no he podido compartir todo el tiempo que desearía por la distancia física que nos ha separado en estos últimos años.

Resumen

La modelización tridimensional se ha ido implementando como una de las mejores formas de documentación del patrimonio histórico. En concreto, en lo que se refiere a la documentación de petroglifos resulta especialmente interesante en su estudio y difusión.

Actualmente, existen diversos métodos de obtener estos modelos 3D, que implican diferentes tipos de instrumental, como escáneres láser o cámaras fotográficas, material informático y software.

En este Trabajo Fin de Máster se pretende obtener una visión general de estos métodos, así como proponer una metodología basada en la fotogrametría de objeto cercano, para las necesidades de un proyecto concreto: el proyecto Tamanart en Marruecos.

Para ello se realizan dos pruebas; una de laboratorio y otra en el Museo Arqueológico Nacional, para comprobar la viabilidad de esta metodología y sus futuras aplicaciones.

Palabras clave: Fotogrametría de objeto cercano, Escáner Láser, Modelización 3D, Visión Artificial, Patrimonio Histórico

Abstract

3D modeling has been implemented in the last years as one of the best ways to document historical and cultural heritage. In particular, referring to petroglyph documentation it is specially interesting to its study and dissemination.

Nowadays, there are several methods to obtain this 3D models that implies different kinds of instruments, like laser-scanners or photographic cameras and computer hardware and software.

In the present Master's Dissertation it is intended to obtain a general vision of this methods, as well as propose a methodology using closed range photogrammetry, based in the needs of a specific project: Tamanart Project, in Morocco.

For this purpose two tests are made, one of them in laboratory and the other in the Museo Arqueológico Nacional, to check the feasibility of this methodology and their future applications.

Keywords: Close-Range Photogrammetry, Laser scanner, 3D Modeling, Computer Vision, Historical & Cultural Heritage

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	5
2. Escáneres basados en luz estructurada	7
2.1. Funcionamiento	8
2.2. Equipo	9
3. Fotogrametría con cámaras compactas	13
3.1. Equipo	13
3.2. Configuración de las cámaras	15
3.2.1. Mejorando la precisión con una configuración apropiada	15
3.2.2. El formato RAW	17
3.3. Calibración	18
3.3.1. Calibración individual	19
3.3.2. Calibración múltiple	20
3.4. Software	22
3.4.1. Algoritmos	23
3.4.2. Software no comercial	24
3.4.3. Software comercial	26
4. Propuesta	29
4.1. Equipo	29
4.2. Configuración de las cámaras	30
4.3. Calibración	32
4.4. Software a emplear	33
5. Pruebas	35
5.1. Prueba de laboratorio	36

5.1.1. Calibración	37
5.1.2. Orientación Relativa	38
5.1.3. Obtención de la nube de puntos	40
5.1.4. Resultados y comparativa	40
5.2. Medición de grabados en el Museo Arqueológico Nacional	43
5.2.1. Calibración	44
5.2.2. Toma de datos	44
5.2.3. Obtención de la nube de puntos	46
5.2.4. Resultados y comparativa	47
6. Conclusiones y trabajo futuro	53
Bibliografía	54
A. Especificaciones técnicas del instrumental	61
A.1. Canon PowerShoot A800©	61
A.2. Canon EOS 5D Mark II ©	63
A.3. DAVID SLS-1©	65
A.4. Artec MHT©	66
B. Ídolos. Museo Arqueológico Nacional	67
B.1. Ídolos. Contexto histórico y geográfico	67
B.2. Ídolo-Placa 1	69
B.3. Ídolo-Placa 2	70
B.4. Ídolo-Placa 3	71
B.5. Ídolo-Hueso	72
C. Planificación y presupuesto	73
C.1. Planificación	73
C.2. Presupuesto	75

Índice de figuras

1.1. Mapa de situación del valle de Tamanart. Fuente: Google Earth©	3
2.1. Esquema de funcionamiento de un escáner de luz estructurada [37].	8
2.2. Configuración de un escáner de mano. <i>Wikipedia</i> ¹	8
2.3. Problemas debidos a la influencia de luz ambiental [25].	9
2.4. DAVID SLS-1	10
2.5. ARTEC MHT	10
2.6. Artec Eva©y Artec Spider©	11
3.1. CHDK funcionando en una cámara <i>Canon PowerShot S95©</i>	14
3.2. Mosaico de bayer	17
3.3. Calibración múltiple en <i>Rau</i> [33]	21
4.1. <i>Canon PowerShot A800©</i>	30
4.2. Configuración de las cámaras	30
4.3. Vista cenital de las cámaras	31
4.4. Configuración de las cámaras	32
4.5. Flujo de trabajo	32
5.1. Objeto a modelar	36
5.2. Comparativa de la misma fotografía en formato RAW (derecha) y con los filtros aplicados por la cámara Canon PowerShoot A800(izquierda)	37
5.3. Proceso de calibración con Photomodeler	38
5.4. Identificación de puntos homólogos con SmartPoints	39
5.5. Resultado de la orientación relativa	39
5.6. Obtención de la nube de puntos en Photomodeler	40
5.7. Recorte de las nubes de puntos obtenida con las cámaras Eos 5D(izquierda) y A800(derecha)	41
5.8. Diferencias entre los recortes de la figura 5.7 (datos en centímetros)	42

5.9. Histograma de las diferencias entre los recortes de las dos nubes de puntos (datos en centímetros)	42
5.10. Ídolos placa	43
5.11. Hueso tallado	44
5.12. Toma de datos en el MAN	45
5.13. Fotografía tomada con objetivo de 85mm	45
5.14. Disposición de las tomas para el Ídolo placa 2	46
5.15. Disposición de las tomas para el Ídolo placa 3	46
5.16. Disposición de las tomas para el Ídolo placa 1	46
5.17. Ídolo placa 1	48
5.18. Ídolo placa 2	48
5.19. Ídolo placa 2. Detalle de una zona del modelo 3D creado a partir de foto- grafías tomadas con el objetivo de 85mm.	49
5.20. Ídolo placa 3	49
5.21. Ortofotografías de los ídolos placa	50
5.22. Hueso tallado	50
A.1. Canon PowerShoot A800	61
A.2. Canon EOS5D Mark II	63
A.3. DAVID SLS-1	65
A.4. ARTEC MHT	66
B.1. Ídolo-Placa 1	69
B.2. Ídolo-Placa 2	70
B.3. Ídolo-Placa 3	71
B.4. Ídolo-Hueso	72
C.1. Diagrama de Gantt	74



Introducción

La creación de reproducciones fiables de petroglifos resulta interesante para su estudio científico, medición y protección contra una eventual destrucción. Uno de los primeros ejemplos de reproducción de petroglifos lo lleva a cabo W. D. Campbell en Sydney, Australia a lo largo del año 1899 [5]. Tradicionalmente, existen tres métodos principales para realizar reproducciones fiables:

- El dibujo a mano alzada o realización de bocetos. Se trata de un método simple y fácil de realizar en el campo pero únicamente proporciona una reproducción 2D y es generalmente demasiado inexacta.
- El frotado directo con el papel o el uso de hojas plásticas es un método adoptado comúnmente pero que ocupa demasiado espacio y que debe ser reducido para un almacenamiento mas eficiente. Además resulta altamente invasivo, requiriendo el contacto directo con el petroglifo y mucho tiempo para obtener resultados fiables.
- El uso de la fotografía está universalmente extendido, aunque su empleo ha ido evolucionando desde los primeros usos para obtener reproducciones en dos dimensiones a la actualidad, en la que el empleo de métodos fotogramétricos y de detección remota nos permiten obtener mediciones geométricas y radiométricas de gran precisión y utilidad en el estudio de petroglifos.

Siendo este último el método más preciso de los tres, que además no exige el contacto directo con la superficie a reproducir y en el que almacenamiento de las reproducciones no ocupa un gran volumen físico, su principal inconveniente era su coste demasiado elevado para obtener modelos tridimensionales. Sin embargo, los equipos láser-escáner

y fotogramétricos actuales se han ido haciendo cada vez de un tamaño mas pequeño, fáciles de manejar y, sobre todo, baratos, lo que ha permitido la extensión de su empleo en este campo.

En lo que se refiere a la técnica fotogramétrica, la posibilidad de utilizar cámaras no métricas para la generación de los modelos 3D ha reducido los costes de manera que ya resultan asequibles en la investigación arqueológica.

Por otra parte, los equipos laser-escáner de bajo coste que actualmente existen en el mercado así como los escáneres de mano cuyo manejo en campo puede resultar mucho mas sencillo que cualquier otro método de modelización 3D, han permitido que su uso también se haya extendido en este campo.

De esta forma, debido a la gran cantidad de instrumental disponible en el mercado en la actualidad, la elección de uno u otro método de modelización 3D debe realizarse en función a las características de la investigación, sus necesidades y el presupuesto disponible.

En el presente Trabajo Fin de Máster (en adelante TFM) se pretenden documentar las técnicas más empleadas en la actualidad para la obtención de representaciones tridimensionales de petroglifos y proponer una metodología para el mismo objetivo que proporcione la precisión y fiabilidad requerida por este tipo de trabajos.

En los capítulos 2 y 3 se explican las tecnologías basadas en láser escáner y fotogrametría de objeto cercano, respectivamente, realizando una primera aproximación a las ventajas y desventajas que ofrece cada una.

En el capítulo 4 se desarrollará una propuesta para la utilización de cámaras compactas en este tipo de trabajos, basándose en lo expuesto en el capítulo 3 y en las diferentes publicaciones consultadas sobre esta temática.

Tras esto, en el capítulo 5 se realizarán una serie de pruebas para analizar la fiabilidad de algunas de las metodologías estudiadas anteriormente.

Finalmente, en el capítulo 6 se expondrán las conclusiones y las recomendaciones para futuros trabajos de la misma temática que el presente TFM.

Introducción

1.1. Antecedentes

El valle del río Tamanart (afluente del Draa) se encuentra al sur de Marruecos, en pleno Antiatlas. En él podemos encontrar una de las mayores concentraciones de pinturas y grabados rupestres de toda la zona[9].

El presente TFM se enmarca dentro de la investigación que se está llevando a cabo en la región para la documentación y análisis de los grabados (Proyecto Tamanart). Se trata de una investigación arqueológica tutelada y desarrollada desde hace dos años por la Universidad Nacional de Educación a Distancia de España(en adelante U.N.E.D) y el Centre National du Patrimoine Rupestre de Marruecos, en la que colabora la Universidad Politécnica de Madrid.



Figura 1.1: Mapa de situación del valle de Tamanart. Fuente: Google Earth©

Aunque como se ha indicado se trata de una investigación arqueológica, en ella es necesario contar con un equipo multidisciplinar que permita la caracterización de la zona y de los propios grabados a través de trabajos geológicos, fotográficos y topográficos.

Debido a la cantidad de rocas, paneles y representaciones que contiene, actualmente los esfuerzos se centran en la zona de Tachokalt (que se dividió en otras dos partes, Tachokalt 1 y 2). En esta zona también destaca la diversidad técnica y estilística, y por la existencia de unos grabados muy finos, que se suponen son los más antiguos de la región.

A comienzos del año 2013 se realizaron los primeros trabajos de campo. Estos consistieron principalmente en:

- Toma exhaustiva de fotografías para la documentación de cada una de las rocas y paneles. Estudios geológicos del área y análisis petrológicos de los soportes rocosos, así como muestreos directos de pátinas con la finalidad de obtener dataciones absolutas, macro y microfotografías, para proceder a estudios traceológicos y tecnológicos.
- Una prospección arqueológica superficial que reveló la presencia de industria lítica y material cerámico de diferentes períodos.
- Un levantamiento topográfico para caracterizar adecuadamente la situación de los grabados.
- Obtención de modelos 3D de algunos de los grabados.

La modelización 3D se llevó a cabo utilizando instrumental y metodologías diferentes:

- **Escaneado láser [15].** Se utilizaron dos modelos diferentes[9]:
 - Un láser escáner de bajo coste DAVID SLS-1. Este equipo está basado en el principio de triangulación y la utilización de luz estructurada. La toma de datos con este instrumento fue especialmente dificultosa. La necesidad de contraste del patrón proyectado en el grabado suponía, con la intensidad de luz en todo el día, un serio problema. La arena del desierto en suspensión y las fuertes rachas de viento hacían imposible una toma de datos adecuada. Para paliar este problema se optó por cubrir el equipo con dos mantas para crear una luz adecuada y para preservar los instrumentos de la arena en suspensión.
 - Un láser escáner de mano Artec MHT. Este modelo también utiliza el principio de triangulación óptica y luz estructurada, aunque en este caso utiliza dos cámaras y no necesita estacionarse. Se encontraron menos problemas para la toma de datos que con el equipo anterior.
- **Fotogrametría de objeto cercano.** Resultó ser el método menos complicado, únicamente se debió tener en cuenta la protección de los equipos para que no fuesen dañados por la fina arena en suspensión.

A partir de los resultados obtenidos en esta campaña se ha decidido realizar un estudio

de las técnicas de modelización de petroglifos.

Este trabajo se desarrolla dentro del proyecto I+D del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte 'Prospección y Documentación de Yacimientos con Arte Rupestre del Valle de Tamanart (Provincia de Tata, región de Guelmin Smara), Marruecos'; y del proyecto I+D: HAR2012-36549 'Segeda y la Serranía Celtibérica: de la Investigación Interdisciplinar al Desarrollo de un Territorio', financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y los fondos FEDER.

El presente TFM pretende realizar una comparativa entre las diferentes metodologías de modelización 3D y exponer una solución adecuada para la toma de datos en las campañas sucesivas con una propuesta acorde a las características y necesidades que presenta la continuación de los trabajos del Proyecto Tamanart.

1.2. Objetivos

Además de las técnicas que han sido empleadas en la campaña 2013, se pretenden analizar otras alternativas y proponer una metodología fotogramétrica que permita realizar la toma de datos de forma sencilla y que sea económicamente asequible para este tipo de trabajos, evitando también las dificultades que puedan existir en el transporte de los equipos a través de las diferentes aduanas internacionales.

Por una parte, la toma de datos realizada en campo, demostró la dificultad que existe para obtener resultados válidos debido a las condiciones físicas del lugar en el que se encuentran los grabados. La tecnología fotogramétrica puede plantearse como una alternativa más sencilla para conseguir resultados asequibles si bien debe tenerse cuidado en que la precisión resulte suficiente para la documentación del objeto, al tratarse de grabados con poco relieve.

La propuesta de metodología fotogramétrica deberá permitir obtener resultados con una precisión geométrica en torno al milímetro, para conseguir recoger todos los detalles de cada grabado acorde a la precisión que requiere el estudio del proyecto Tamanart.

Otro de los condicionantes de la propuesta ha de ser la sencillez de uso. Lo ideal sería que no fuese necesario un estacionamiento durante un largo periodo de tiempo, puesto que debido a las condiciones de viento y del terreno no se podría conseguir una estabilidad suficiente. En cuanto a la parte económica, se pretenden utilizar cámaras compactas asequibles y disponibles en cualquier tienda especializada, aunque con una resolución geométrica suficiente, superior a 10 Mpx.

Esta metodología se pretende comparar con las utilizadas anteriormente y comprobar si resulta factible utilizarla en campo, realizando pruebas de laboratorio y análisis previos.

El resultado final del TFM será una propuesta de metodología alternativa para la toma

de datos en las próximas campañas arqueológicas del Proyecto Tamanart analizando resultados preliminares del modelo.



Escáneres basados en luz estructurada

Actualmente existe una creciente necesidad de construcción de modelos tridimensionales para una gran variedad de objetos. El desarrollo de instrumentos láser escáner permite la obtención en un corto intervalo de tiempo de estos modelos para grandes áreas, que podemos georeferenciar de forma sencilla al encontrarse estos instrumentos fijos sobre un punto.

Sin embargo, para la obtención de modelos de pequeñas áreas u objetos con una alta precisión, el trabajo con este tipo de instrumentos puede resultar demasiado aparatoso y en algunos casos imposible.

Para este tipo de tareas se han desarrollado instrumentos que utilizan el principio de triangulación a través de la proyección de luz estructurada que integra mediciones de forma y, en el caso de los escáneres de mano, autorreferenciación.

Esta nueva generación de escáneres se está implementando en tareas de ingeniería inversa, digitalización de modelos, patrimonio histórico e, incluso, para el escaneo del cuerpo humano en labores médicas [26].

Además, esta tecnología es una de las que se usan en las campañas iniciales del proyecto Tamanart para obtener modelos tridimensionales de petroglifos.

En este apartado se presentará este tipo de tecnología, las soluciones que ofrece y se demostrará la viabilidad de aplicación en los trabajos a los que se dirige el presente TFM.
--

2.1. Funcionamiento

A diferencia de otro tipo de escáneres basados en la medición del tiempo de vuelo o la diferencia de fase, que utilizan la proyección de un haz láser sobre el objeto, los escáneres de mano proyectan un patrón de luz estructurada, bidimensional, de rayas o rejilla, que permite adquirir una gran nube de puntos simultáneamente utilizando el principio de triangulación.

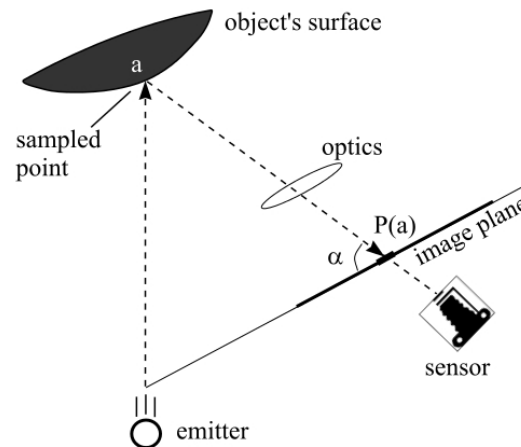


Figura 2.1: Esquema de funcionamiento de un escáner de luz estructurada [37].

El escáner consiste en un proyector que emite la luz estructurada sobre el objeto y una cámara que obtiene imágenes de dicho objeto [37]. Los objetos deben permanecer estáticos durante la toma de datos.

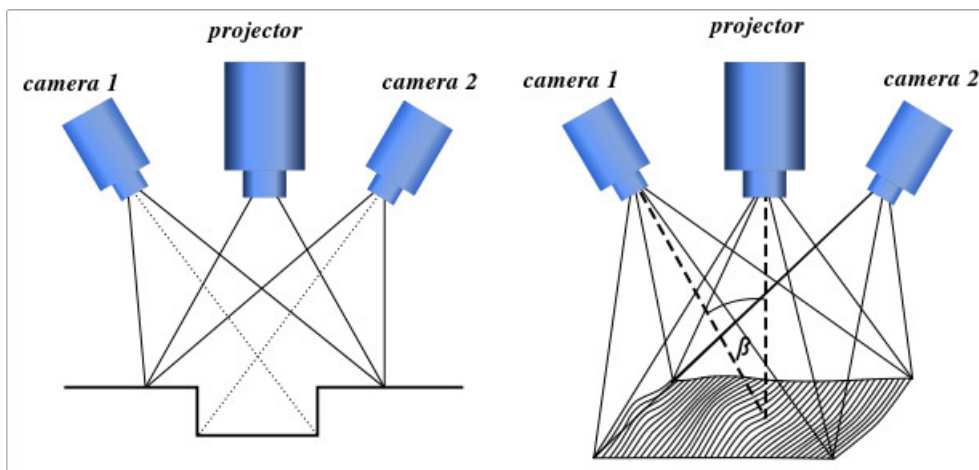


Figura 2.2: Configuración de un escáner de mano. Wikipedia¹.

En lo que se refiere a escáneres de mano, la configuración del sistema suele estar basada en dos cámaras sincronizadas y un diodo láser que proyecta un determinado patrón[20].

¹http://es.wikipedia.org/wiki/Escáner_de_luz_estructurada Vis. Febrero 2014

De esta forma, las dos cámaras miden las deformaciones de este patrón desde su punto de vista utilizando el citado principio de triangulación, con las que se obtiene la nube de puntos final.

En algunos casos, este tipo de instrumental puede llevar también una tercera cámara de color para obtener texturas apropiadas, aunque éstas también pueden ser añadidas a posteriori sobre la malla, utilizando imágenes tomadas con una cámara externa.

Además, la proyección de un patrón en donde se pueden identificar una gran cantidad de puntos permite la obtención de los parámetros de orientación externa para referenciar la posición del objeto y el sensor sobre un sistema de coordenadas local, lo que posibilita la obtención de nubes de puntos mucho mayores al realizarse un gran número de tomas consecutivas.

La precisión de estos instrumentos mejora en función de la distancia a la que son tomados los datos, de este modo son más adecuados para objetos de tamaño reducido (hasta 2 m.), pudiendo además resultar en la generación de información redundante si se usa en objetos mayores[25].

Otro de los problemas que pueden presentar este tipo de instrumentos es la influencia de la luz ambiente y el material del objeto a modelar (figura 2.3). Como se ha expuesto en varios estudios [16][29], la toma de datos con luz solar directa resulta muy difícil, con lo que, teniendo en cuenta la zona de trabajo objetivo de este TFM, deben utilizarse medios para conseguir tomas adecuadas (en el caso de las pruebas realizadas en 2013 se utilizaron mantas para tapar la zona a modelar).

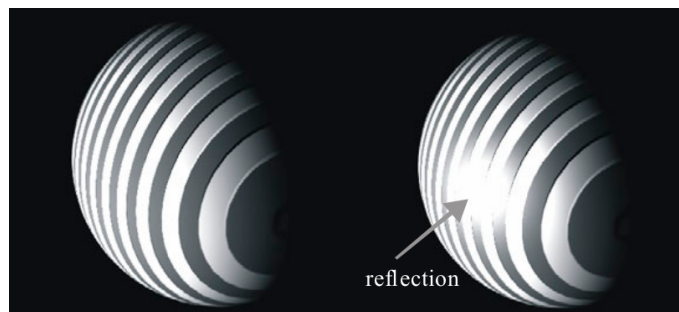


Figura 2.3: Problemas debidos a la influencia de luz ambiental [25].

2.2. Equipo

El equipo utilizado en los trabajos de campo realizados durante 2013 se compone de un escáner de luz estructurada DAVID SLS-1 (ver apéndice A.3) y un escáner de mano Artec MHT (ver apéndice A.4). Ambos se basan en la proyección de luz estructurada a través de un diodo láser, explicado en el apartado anterior.

DAVID Laserscanner[46] es un programa para realizar escaneo láser 3D a bajo coste. Permite utilizar una cámara común o una ‘webcam’ y un láser de línea de una manera similar a *Chen et al.*[7] generando un modelo en tiempo real. Su desarrollo comienza en septiembre de 2006 por dos informáticos alemanes que publican un artículo[46] que da lugar al proyecto. En un principio se trataba de un software gratuito, pero desde 2008 se trata de un software de bajo coste al que se ha añadido la opción de adquirir diversos instrumentos.



Figura 2.4: DAVID SLS-1

Uno de ellos es el denominado DAVID SLS-1, equipo que utiliza un proyector de video con una lente especial y una cámara industrial montados sobre un trípode, con una línea base que se debe adaptar al tamaño del objeto y a la distancia del mismo con el sensor. De esta forma se debe montar y calibrar el instrumento cada vez que se quiera estacionar en el lugar en el que se encuentre el objeto a modelar.



Figura 2.5: ARTEC MHT

Por otra parte, el equipo ARTEC MHT es uno de los modelos de escáner 3D de mano que existen en el mercado y que compite directamente con los Handyscan© o Z Scanner©. A diferencia de otros escáneres de la marca Artec, como el MH, tiene la capacidad de obtener imágenes en color gracias a una cámara adicional RGB. Utiliza el software Artec Studio 8.0 para el escaneo y manejo de la nube de puntos previo a su transformación a

una malla.

Este tipo de escáneres tienen la ventaja de una extremada sencillez de uso a la hora de la toma de las imágenes y con el potencial de producir nubes de puntos con una precisión de hasta 0.04 mm.

Actualmente se encuentra descatalogado y no se puede adquirir directamente. Ha sido sustituido por los escáneres Artec Eva© y Artec Spider© que tienen una disposición diferente en lo que se refiere a sus sensores.



Figura 2.6: Artec Eva© y Artec Spider©



Fotogrametría con cámaras compactas

Tradicionalmente en fotogrametría se han utilizado cámaras métricas, sin embargo, en la última década el uso de cámaras digitales compactas no métricas, más asequibles, se está extendiendo en la fotogrametría de objeto cercano y en campos como arquitectura, arqueología o el patrimonio[28]. El gran avance en la resolución geométrica y radiométrica, la bajada de precios o la mejora de los medios para el almacenamiento de los datos son las principales razones para la implantación de estos instrumentos. Además, el software de tratamiento de datos (Photomodeler, PhotoScan, Image Master,...) ha contribuido a la popularización de su uso para fotogrametría, incluso por profesionales no relacionados con la misma.

El mercado ofrece una gran variedad de cámaras de este tipo. Aunque el empleo de teléfonos móviles con cámara o ‘smartphones’ ha reducido la oferta, se pueden encontrar un gran número de ellas con resoluciones de más de 10 Mpx.

En este apartado se tratará la utilización de este tipo de cámaras para la obtención de modelos 3D de grabados rupestres.

3.1. Equipo

Como se ha dicho, en la actualidad, existe una gran oferta de cámaras compactas con características apropiadas para la fotogrametría de objeto cercano. Aunque para determinar la más adecuada se necesitarían realizar numerosas pruebas de laboratorio con cada una de ellas, éste no es el objetivo del presente trabajo y, simplemente, la elección

consistirá en un análisis de las características técnicas y su coste económico.

En muchos casos, estas cámaras están diseñadas para un uso común, en el que el usuario no tiene grandes conocimientos de fotografía y por tanto, muchos de los procesos, como el enfoque, la abertura,... están automatizados, este hecho puede resultar un inconveniente para su aplicación en fotogrametría.

Para cámaras de la marca *Canon*®(en sus modelos *Point&Shoot*®), existe un software desarrollado por una comunidad de entusiastas de la fotografía, que permite utilizar características de la cámara que no podríamos usar con su 'firmware' original llamado CHDK. Algunas de las funcionalidades extras que este software permite son [6]:

- Obtener fotografías en formato RAW.
- Utilización del cable USB como disparador remoto.
- Ajuste de la apertura, ISO,...
- Utilización de scripts. Creados por la comunidad o hechos ad-hoc para un uso específico: detección de movimiento para UAVs, creación de 'time-lapses', etc.
- etc.

El programa CHDK únicamente requiere ser guardado en una tarjeta de memoria SD desde la que será cargado por la cámara. Su uso no necesita ninguna modificación adicional de la cámara ni sustituye al firmware original.



Figura 3.1: CHDK funcionando en una cámara *Canon PowerShot S95*®

De esta forma, la utilización de cámaras *Canon*®, como se verá en el capítulo 4, puede resultar más adecuada al permitir el uso de este software que, aunque seguramente se haga extensible a otras cámaras, está diseñado originalmente para las de esta marca comercial que incorporen procesadores DIGIC II, III y IV.

3.2. Configuración de las cámaras

Una de las partes más determinantes para obtener una precisión adecuada es la disposición física de las cámaras, puesto que ésta influirá en la distancia a la que deben obtenerse las imágenes, los solapes o los ángulos de convergencia entre las mismas.

La propuesta del presente TFM se basa en diferentes publicaciones que han analizado la utilización simultánea de múltiples cámaras para la modelización 3D de objeto próximo:

- *Wenzel et al.* [45] muestra un sistema en el que se emplean varias cámaras y una *Microsoft Kinect*® para proyectar texturas en objetos poco definidos. Con él se pueden alcanzar 3.5 millones de puntos con un simple disparo y una precisión submilimétrica a una distancia de 70 cm. Emplea la tecnología ‘Structure and Motion’.
- En el estudio de *Rau* [33] se utilizaron 5 cámaras reflex, de una resolución de 24 Mpx, con diferentes configuraciones. Con la captura que resultó más precisa, empleando fotogrametría convergente y calibrando previamente las cámaras, se obtuvo un RMSE de 0.26 mm. Además, se describe una metodología para la obtención de modelos 3D con este tipo de cámaras.
- *Heinrich et al.* [22] propone la utilización de 3 focales diferentes para obtener ángulos de intersección adecuados en las líneas epipolares.

3.2.1. Mejorando la precisión con una configuración apropiada

La geometría interna de las cámaras compactas es generalmente muy inestable, por lo que una metodología y una configuración adecuada de las mismas es indispensable para la aplicación de éstas en fotogrametría. Además, hay que tener en cuenta numerosas restricciones para la definición de la distancia entre cámaras, la distancia al objeto y la focal.

Estos errores sistemáticos causados por distorsiones de la lente también han sido documentados en numerosos estudios, así como aquellas metodologías que permitan minimizarlos [12], una de ellas es el uso de fotogrametría convergente.

El uso del caso normal de la fotogrametría, en el que la posición de la cámara es paralela al plano del objeto y los ejes ópticos intersecan ortogonalmente con el mismo, está ampliamente extendido. En contraste, la toma de imágenes ligeramente convergentes (con un ángulo de aproximadamente 10°), en la que los ejes ópticos de las cámaras intersecan en un mismo punto del plano objeto, ha sido estudiada en algunos artículos y tesis para su utilización en cámaras compactas dando resultados que demuestran la reducción de los citados errores sistemáticos y el aumento de la precisión en los modelos 3D obtenidos por este método [43].

Por otra parte, la sobreposición con la que deben ser obtenidas las imágenes debe ser

grande para la reducción de áreas ocultas. Esto se consigue con líneas base pequeñas, que por otra parte deben ser acordes con el ángulo de convergencia entre cámaras y la resolución de las mismas.

Existen también análisis sobre fotogrametría de objeto cercano [34] de los que se obtienen una serie de conclusiones y recomendaciones a la hora de diseñar la configuración de las cámaras y su calibración:

- La precisión aumenta con el incremento de la relación ‘base-to-depth’ (B/D)¹ y utilizando imágenes convergentes (fotogrametría convergente) en vez de imágenes con los ejes ópticos paralelos (caso normal de la fotogrametría).
- La precisión crece con el número de imágenes en las que aparece el mismo punto. Sin embargo el mismo punto en más de cuatro imágenes apenas supone una mejora.
- Una mayor resolución de la imagen (número de píxeles) mejora significativamente la precisión.
- La autocalibración (con o sin puntos de control) es fiable únicamente cuando la geometría de la configuración es favorable, principalmente cuando se usan imágenes convergentes de un gran número de ‘targets’ o dianas bien distribuidos espacialmente.
- Debería realizarse una calibración completa de la cámara, para obtener los parámetros de distorsión de la lente. En la mayoría de las cámaras compactas actuales la focal se puede obtener en el cabecero del propio archivo de la imagen digital. Esto se puede usar en cámaras no calibradas en las que la autocalibración no es posible.

En cuanto a la configuración en la que cada cámara debe programarse, el software CHDK permite utilizar las siguientes características [12]:

- Enfoque fijo.
- Máxima apertura posible del diafragma .
- Mínimo ISO para reducir el ruido.
- Disparador simultáneo.
- Se ha demostrado que la toma de imágenes en formato RAW, evitando el preproceso al que son sometidas cuando la cámara las transforma a otro formato, puede incrementar la precisión en un 30 % [39].

Evidentemente esta configuración es adecuada para unas condiciones de laboratorio, para situaciones más extremas es posible que tenga que ser modificada.

¹Relación entre la distancia entre cámaras y la distancia de las mismas al objeto

3.2.2. El formato RAW

El formato de imágenes RAW ("formato de imagen sin modificaciones") es un formato de archivo digital de imágenes que contiene la totalidad de los datos de la imagen tal y como ha sido captada por el sensor digital de la cámara fotográfica.

Las imágenes en formato JPG que proporcionan las cámaras, a primera vista pueden tener una mejor apariencia visual debido a que el software original de la cámara aplica distintos filtros digitales para mejorarla. Sin embargo, la información radiométrica que contienen este tipo de imágenes frente a las tomadas con formato RAW es mucho menor debido a su compresión. Una foto en JPG contiene 24 bits/píxel (8 por canal) frente a los 30 a 48 bits/píxel (10 a 16 por canal) que suele contener la imagen obtenida al utilizar el formato RAW.

Además, los sensores de las cámaras, a excepción de algunos de la marca Foveon ², no son capaces de captar toda la información radiométrica sino que únicamente recogen una banda de color, distribuyéndose en forma de mosaico de Bayer. El mosaico de Bayer está

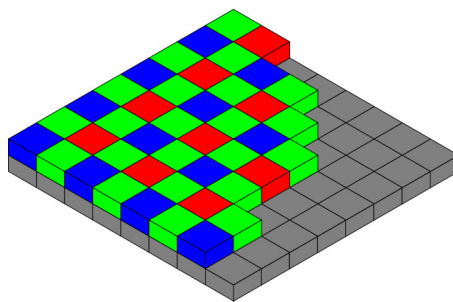


Figura 3.2: Mosaico de bayer

formado por un 50 % de filtros verdes, un 25 % de rojos y un 25 % de azules. La razón de que se use mayor cantidad de puntos verdes es que el ojo humano es más sensible a ese color. La disposición de los colores suele ser rojo-verde-rojo-verde... en una fila, y verde-azul-verde-azul en la siguiente fila paralela. Interpolando dos muestras verdes, una roja, y una azul se obtiene un píxel de color. Existen diferentes formas de interpolación y los software de las cámaras, especialmente las compactas, dan prioridad a la estética de la imagen frente a la calidad radiométrica.

En los ficheros RAW se guarda la información del patrón de Bayer de forma directa, sin interpolaciones, lo cual puede ser aprovechado posteriormente por los programas de revelado digital para una decodificación de mayor calidad que la que permiten los algoritmos internos presentes en los dispositivos de captura.

Como se indica en [39] las imágenes que proporciona una cámara compacta (JPG) no están pensadas para un uso en proyectos fotogramétricos, por ello la toma de imágenes en

²http://es.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3

formato RAW y su posterior conversión a otros formatos (JPG, TIFF,...) aplicando únicamente un filtro VNG permitirá obtener unos resultados más adecuados.

3.3. Calibración

El uso de cámaras compactas, como se ha dicho en apartados anteriores, conlleva una geometría interna de las mismas altamente inestable. Sin embargo, un gran número de errores sistemáticos pueden ser modelados a través de una calibración que permita definir adecuadamente esta geometría para obtener mejores resultados.

Una cámara se considera calibrada si la distancia principal, el punto principal y las distorsiones de la lente son conocidos. En muchas aplicaciones, únicamente la distancia focal es recuperada, mientras que para mediciones precisas en fotogrametría generalmente son empleados todos los parámetros de calibración interior (IOPs, en sus siglas en inglés).

En cuanto a los procesos matemáticos para obtener estos parámetros, a lo largo de los años se han desarrollado varios algoritmos de calibración, de los que actualmente el más empleado se puede considerar el ajuste por haces ('bundle adjustment'), introducido en la fotogrametría de objeto cercano en los años setenta.

Por otra parte, la adquisición de imágenes a través de un sistema de varias cámaras hacen que sean necesarios métodos de calibración adaptados a este tipo de procesos, que permitan también obtener los giros y traslaciones de las cámaras que conforman los parámetros de orientación exterior (EOPs, en sus siglas en inglés) del sistema y agilizar así el proceso de reconstrucción.

Rau [33] divide el proceso de calibración de un sistema multicámara en dos partes:

- La calibración de cada cámara por separado. En este proceso los parámetros de orientación interior de cada cámara son calibrados independientemente usando puntos de apoyo codificados a través de una autocalibración o un ajuste con parámetros adicionales.
- La calibración del sensor que forman el conjunto de cámaras. Una vez montadas todas las cámaras con la configuración previamente diseñada, se determinan los parámetros de orientación exterior del conjunto utilizando también puntos de apoyo codificados.

Una vez realizada la calibración y obtenidos los parámetros de orientación interior y exterior, se podrán obtener nubes de puntos del objeto de manera precisa, sin necesidad de contar con puntos de apoyo adicionales.

3.3.1. Calibración individual

El propósito de este proceso, como se ha dicho, es describir matemáticamente la geometría interna de cada cámara. Existen tres métodos comúnmente usados para este tipo de calibración, en función de las precisiones y los recursos que se dispongan[13] [42]:

- Calibración en laboratorio. Tradicionalmente usada en cámaras para fotogrametría aérea, los IOPs se determinan usando goniómetro o colimador. Los instrumentos usados con este método normalmente son caros y con una gran dificultad de manejo que hacen que sean poco empleados para fotogrametría de objeto cercano.
- Calibración ‘in situ’ (*‘on-the-job calibration’*). En este caso la estimación de los parámetros de la cámara y la toma de datos del objeto se realizan al mismo tiempo. Este método es muy útil especialmente cuando sobre el objeto no se pueden utilizar puntos de apoyo para la autocalibración o cuando los IOPs de la cámara se consideran inestables, por lo que se debe recalibrar frecuentemente. Se disponen puntos de control (con coordenadas conocidas) en una zona cercana al objeto que va a ser modelado y los parámetros de la cámara son reconstruidos mediante un ajuste por haces con parámetros adicionales [8].
- Autocalibración (*‘self-calibration’*). Los IOPs y las coordenadas 3D se pueden determinar simultáneamente utilizando la información que proporcionan los puntos de apoyo situados en el objetivo. Se emplean las ecuaciones de colinearidad [13], que son modificadas para añadir las distorsiones de la lente (parámetros adicionales).

El término calibración ‘in-situ’ (*‘on-the-job calibration’*) en ocasiones se confunde con el de autocalibración. En esta última no hay de facto necesidad de puntos de control. En [8] se describen los criterios que debe seguir la autocalibración:

- Una cámara debe tomar al menos tres imágenes del objeto.
- La geometría del objeto y de la cámara deben ser estables durante el proceso.
- La distribución de la toma de imágenes debe ser convergente.
- Al menos una imagen debe tener un ángulo significativamente diferente de los demás
- Se debe usar un número relativamente alto de puntos bien distribuidos.

Es necesario destacar la necesidad de una buena configuración en la toma de las imágenes. La disposición convergente y las imágenes rotadas sobre un objeto preferiblemente 3D con puntos de apoyo bien distribuidos evitará la inestabilidad en la estimación por mínimos cuadrados y el uso inapropiado de parámetros adicionales que harían mas débil el ajuste por haces [35].

Un ejemplo de este tipo de calibración lo tenemos en Rau [33], donde se emplea una mesa rotatable sobre la que se disponen hasta 112 pilares de entre 0 y 30 cm de

profundidad, sobre los que se colocan los puntos de apoyo codificados. La cámara permanece fija, mientras que la mesa va girando para cada toma, de manera que se consigue una disposición de las imágenes adecuada, acorde a las recomendaciones dadas en párrafos anteriores.

En [12] podemos encontrar otro ejemplo de calibración con 114 puntos de apoyo codificados, en el que se estudia también la necesidad de puntos de control en este tipo de calibración.

En cuanto a los algoritmos, en *Remondino et al.* [35] se analizan algunos de los mas usados, mientras que para implantarlos existen numerosos ejemplos ya programados, como en 'Camera Calibration Toolbox for Matlab®'³ que utiliza unos parámetros similares a los de *Heikkilä*[21].

A su vez, la mayoría de programas comerciales usados en fotogrametría de objeto cercano como *ImageMaster*© o *Photomodeler*© disponen de software que permite realizar una autocalibración.

Existen métodos alternativos como la calibración utilizando la DLT ('*Direct Linear Transformation*'), que da resultados con una precisión mucho menor en comparación con las anteriores, o la calibración usando líneas de plomada ('*plumb-line calibration*').

La validez de la calibración a lo largo del tiempo es otro aspecto importante a tener en cuenta. *Wackrow* [44] examina la estabilidad geométrica de una cámara compacta a lo largo de un año, llegando a establecer una variabilidad entre 0.5 y 2.5 mm en errores medios para modelos 3D de objetos tomados a 1.5 metros de distancia de una cámara capaz, a su vez, de obtener DEMs a esta distancia con una precisión de 1.5 mm.

La cámara utilizada fue una Nikon Coolpix 5400 y, evidentemente, cada cámara tiene sus características por lo que los resultados no son completamente extrapolables a todas las no-métricas, pero si se puede concluir que este tipo de cámaras requieren una calibración más frecuente, debido a la inestabilidad de sus IOPs, especialmente teniendo en cuenta las condiciones a las que van a ser sometidas en la toma de datos objetivo de este TFM (traslado a otro país, condiciones climatológicas extremas,...).

Por tanto, lo ideal sería emplear una autocalibración con un gran número de puntos de apoyo, bajo condiciones óptimas, antes de la toma de datos para determinar los parámetros de la cámara y, a ser posible, una calibración 'in-situ' que asegure la estabilidad de los mismos debido a las condiciones en las que se van a desarrollar los trabajos.

3.3.2. Calibración múltiple

Una vez determinados los parámetros de cada cámara, el sistema puede formarse con la configuración previamente definida. Tras esto, para agilizar el proceso de orientación

³www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ Visitado en Febrero 2014

relativa y mejorar la precisión de los resultados, se deben conseguir los EOPs del sensor que forman las cámaras.

En este aspecto, como en el caso de la calibración de cámaras individuales, también existen algunos estudios sobre este tipo de procesos, entre ellos:

- Wencel *et al.* [45] utiliza un proceso de 'Structure from motion' para reconstruir la escena de la toma.
- Maas [31] propone una calibración completa del sistema multi-cámara utilizando una barra de referencia con distancia conocida.
- Svoboda *et al.* [40] utiliza una marca puntual móvil (que puede ser creada por un simple puntero laser) sobre un área de trabajo. Esta calibración asegura una precisión sub-píxel en un corto espacio de tiempo y, aunque puede servir para obtener los IOPs de cada cámara, se podrían añadir los obtenidos durante la calibración individual. El software es gratuito y está disponible en la web del autor⁴ para *Matlab*© y *Octave*©.
- Rau [33] utiliza un panel de dimensiones similares al objeto a modelar para obtener los EOPs.

Este último método resulta el más interesante al desarrollarse en un estudio similar al del caso propuesto en el presente TFM.

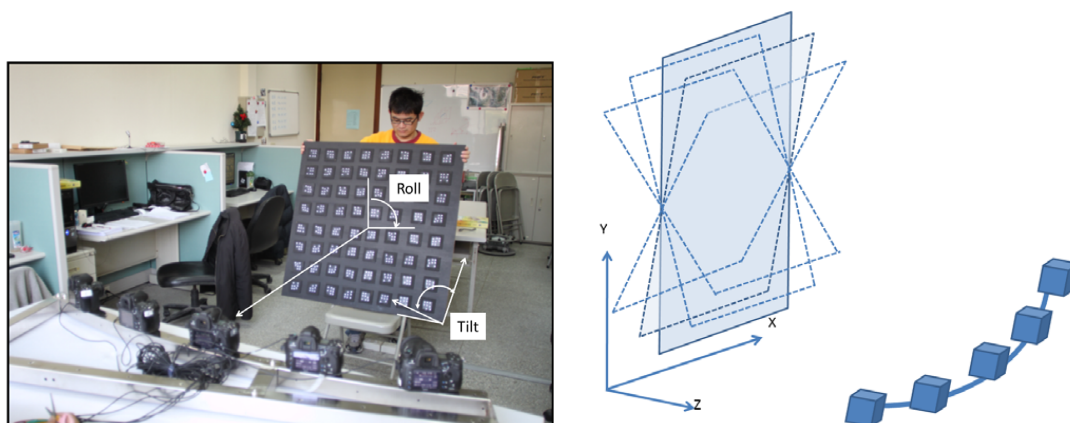


Figura 3.3: Calibración múltiple en Rau [33]

Como se ha dicho, se trata de un panel en el que se han añadido numerosos puntos de apoyo codificados, con un tamaño similar al área a modelar (es decir, en torno a 1.20 x 1.60 m). El sensor formado por las cámaras se mantiene fijo, mientras el panel es el que se gira entre 5-7 veces en cada dirección (*pitch*, *roll* & *tilt*) para construir ángulos de 90 grados convergente y así obtener una buena geometría que nos permita reconstruir los EOPs.

⁴<http://cmp.felk.cvut.cz/~svoboda/SelfCal/> Visitado en Febrero 2014

La reconstrucción se hace mediante un ajuste de haces (*'bundle adjustment'*) tras el reconocimiento automático de los puntos de apoyo codificados.

Si disponemos también de puntos de control, podríamos realizar la calibración individual de cada cámara *'in-situ'*, aunque en el mismo estudio de Rau [33] se comprueba que introducir los IOPs obtenidos por autocalibración individual durante el ajuste de haces proporciona unos resultados más precisos.

Esta calibración se debe llevar a cabo cada vez que se ensamble el sensor formado por las cinco cámaras. De este modo, si se realiza el transporte con el conjunto de cámaras desmontado, debe tenerse en cuenta que también habría que llevar el instrumental necesario para realizar este proceso.

3.4. Software

Hasta el año 2000, la fotogrametría y la visión artificial habían trabajado casi independientemente en el problema de la reconstrucción tridimensional. Los fotogrametristas trabajaban con imágenes analógicas bien calibradas para aplicaciones metrológicas en procesos que involucraban mucha intervención por parte del operador. Al mismo tiempo, la comunidad de visión artificial estaba trabajando en imágenes de baja resolución para su aplicación en tiempo real sin interacción por parte de un operador [10].

En los últimos años se ha podido observar una revolución en lo que a software de reconstrucción 3D se refiere. A la par que se ha ido incrementando la posibilidad de obtener imágenes y los avances en informática, han ido apareciendo nuevos algoritmos de la mano del campo de la visión artificial (*'computer vision'*) que a su vez se han ido introduciendo en software usado en fotogrametría (especialmente de objeto cercano).

De este modo, ambos campos, fotogrametría de objeto cercano y visión artificial, no tienen una frontera clara, compartiendo en los dos casos una misma finalidad: la modelización 3D de objetos reales.

Así, el reconocimiento de puntos homólogos en varias imágenes se ha mejorado con técnicas como *'Scale-invariant feature transform'* (SIFT [30]) publicada en 1999 por David Lowe, las posiciones de la cámara se pueden determinar mediante *'Structure from motion'* y algoritmos como *'Semi-Global Matching'* (SGM [23]) nos permiten obtener las nubes de puntos en tres dimensiones.

Todos estos avances se han ido reflejando en los numerosos software disponibles para fotogrametría, disponiendo de un amplio número de soluciones para cada objetivo concreto.

Queda fuera del alcance de este TFM el análisis pormenorizado de cada uno de los programas fotogramétricos existentes en el mercado. Sin embargo, si se pretende dar una pequeña aproximación que ayude a la hora de escoger el adecuado para el objetivo final

de los trabajos.

Dado el carácter académico de este TFM, es inevitable exponer en primer lugar los programas de código abierto o no comerciales que actualmente existen y que, además, en muchos casos están a la vanguardia en este tipo de tecnologías.

Por otra parte, el software comercial disponible en el mercado cuenta con una gran tradición y ha sufrido una evolución que ha permitido grandes avances a nivel de producción.

3.4.1. Algoritmos

Como se ha expuesto anteriormente, la obtención de una nube de puntos a partir de imágenes implica la utilización de diversos algoritmos en varias tareas:

- La calibración individual de las cámaras. Ya discutida anteriormente.
- Localización de los puntos homólogos para la obtención de los parámetros de orientación externa. Para esta tarea existen dos aproximaciones [2]:
 - La comparación a partir de áreas (*'Area Based Matching'*, ABM). Basadas en la correlación y la aplicación de mínimos cuadrados.
 - La comparación basada en elementos (*'Feature Based Matching'*, FBM).

En fotogrametría se ha venido aplicando comúnmente los algoritmos basados en técnicas ABM (principalmente en fotogrametría aérea donde la adquisición de las imágenes se aproxima más al caso normal), sin embargo las mejoras en cuanto a velocidad y precisión que han desarrollado las técnicas FBM a través del campo de la visión artificial ha sido aprovechada por diversos programas de fotogrametría. El algoritmo SIFT [30] se ha venido imponiendo como una solución muy eficiente para esta tarea [19].

- Obtención de la orientación externa. Aunque la propuesta para la obtención de los EOPs que se ha explicado anteriormente al tratarse de una configuración fija, implica la utilización de patrones, con lo que únicamente se necesitaría realizar un ajuste de haces, en la actualidad, las técnicas de *'Structure from motion'* permiten obtener las posiciones de la cámara a partir de diferentes tomas desordenadas de forma automática sin realizar ningún tipo de medición manual, utilizando las técnicas de comparación de puntos homólogos explicadas en el párrafo anterior [36].
- Extracción de la nube de puntos. Para esta tarea existen numerosos algoritmos MVS (*'Multi-View Stereo'*) desarrollados en los últimos años que han agilizado y mejorado la producción. A diferencia de los anteriores, estos algoritmos se centran en pares de fotografías y extraen un número de puntos homólogos mucho mayor. Podemos usar algoritmos de *'Structure from motion'* [36], *'Semi-Global Matching'* [23] u otros métodos desarrollados en la última década que se están imponiendo en este campo[14].

3.4.2. Software no comercial

Existe una gran variedad de software de código abierto disponible para su utilización en fotogrametría de objeto cercano. De hecho, se puede encontrar incluso una distribución del sistema operativo Debian, enfocado a proyectos de arqueología, que reúne un gran número de aplicaciones de este tipo y ahorra la tediosa tarea de instalar las numerosas dependencias y librerías necesarias para su funcionamiento ⁵. Además de esto, existen páginas de referencia que tratan de reunir toda la información posible acerca de este tipo de software ⁶.

La mayoría de estos proyectos están orientados a una tarea concreta, lo que hace que en pocos casos se trate de soluciones integrales para todos los procesos que se han descrito (en algunos casos como el de la distribución ArcheOS que se ha comentado, lo que se hace es reunir varios de estos programas).

Calibración individual

Para la calibración individual de la cámara existen numerosas alternativas, como se ha explicado en la sección correspondiente. Desde la opción de '*Matlab calibration toolbox*' ya comentada, hasta la solución en Python que ofrece la librería '*OpenCV*' ⁷. Al tratarse de soluciones de código abierto, las posibilidades de adaptación a los requerimientos de cada proyecto son muy grandes (desde cambios en el patrón o en los parámetros a utilizar).

Calibración múltiple

En cuanto al software para la obtención de los EOPs del sensor formado por las cinco cámaras, existen varias soluciones para la obtención de las posiciones de las cámaras basadas en '*Structure from motion*' como '*Bundler*' ⁸ o '*VisualSFM*' ⁹ (en este caso no se trata de un programa de código abierto aunque se puede usar libremente para uso no comercial), que resultan fáciles de usar y están enfocadas a un gran número de imágenes para reconstruir una zona amplia. Este software tiene muchas ventajas desde el punto de vista de la visión artificial: pueden trabajar incluso cuando las imágenes han sido adquiridas por usuarios sin nociones de fotogrametría y permiten obtener nubes de puntos fácilmente. Sin embargo, para este tipo de soluciones el precio a pagar es un rigor fotogramétrico escaso en la formulación de las ecuaciones que podría resultar inaceptable en términos de precisión.

Por otra parte, existen otras posibilidades más enfocadas al tipo de orientación que se pretende obtener en este TFM:

⁵<http://www.archeos.eu/wiki/doku.php/> Vis. Febrero 2014

⁶<http://opensourcephotogrammetry.blogspot.com.es/> Vis. Febrero 2014

⁷https://opencv-python-tutroals.readthedocs.org/en/latest/py_tutorials/py_calib3d/py_calibration/py_calibration.html Vis. Febrero 2014

⁸<http://www.cs.cornell.edu/~snave/bundler/> Vis. Febrero 2014

⁹<http://ccwu.me/vsfm/> Vis. Febrero 2014

- *APERIO*¹⁰ es la solución que ofrece el IGN francés para la orientación de imágenes [10]. Se compone de tres módulos principales:
 - Un módulo especializado en la computación de la solución inicial, con la posibilidad de obtener la calibración interna.
 - El módulo con el ajuste de haces ('bundle adjustment'), basado en el algoritmo de Levenberg-Markard [32].
 - Varios módulos para importar y exportar datos.

Como en el caso de la calibración individual, al tratarse de una solución de código abierto, puede modificarse para adaptarse a las necesidades de un proyecto en concreto.

- *ORPHEUS-ORIENT*¹¹. Es un software desarrollado en el '*Institute of Photogrammetry of the Vienna University of Technology*'. Ofrece muchas posibilidades para calcular la orientación de las fotografías. Con el fin de obtener los valores aproximados necesarios para el cálculo del bloque, el software propone un método automático y otro interactivo [18].
- *DGAP-Bundle adjustment*¹². Este programa implementa el método de ajuste de haces inventado por Helmut Schmid y Duane Brown. Basado en la perspectiva central, la relación geométrica entre el objeto y la imagen son determinadas por mínimos cuadrados.
- *OpenCV*¹³. Se trata de una serie de librerías para C++ con soluciones para visión artificial, muchas de ellas con posibles aplicaciones en fotogrametría de objeto cercano, como se ha visto sobre el módulo para la calibración de cámaras. En lo referido a la obtención de los EOPs, OpenCV tiene un módulo dedicado al ajuste de haces que puede utilizarse para esta tarea.

Obtención de la nube de puntos

Para esta tarea existen varios programas que implementan los diferentes algoritmos de MVS:

- *CMVS/PMVS2*¹⁴. Desarrollados por Yasutaka Furukawa, se trata de dos programas diferentes: CMVS descompone las imágenes de entrada, con sus orientaciones, en una serie de 'clusters' de un tamaño mas manejable, mientras PMVS2 utiliza el algoritmo MVS desarrollado por el autor [14] sobre estos 'clusters' de imágenes para obtener la nube de puntos.

¹⁰<http://www.micmac.ign.fr/index.php?id=3> Vis. Febrero 2014

¹¹<http://photo.geo.tuwien.ac.at/software/orient-orpheus/> Vis. Febrero 2014

¹²<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/index.en.html> Vis. Febrero 2014

¹³<http://opencv.org/> Vis. Febrero 2014

¹⁴<http://www.di.ens.fr/pmvs/> Vis. Febrero 2014

- *MicMac*¹⁵. Se trata de la solución para esta tarea del IGN francés, utiliza los datos de salida del programa APERO antes expuestos (parámetros de las cámaras y orientaciones) para obtener los modelos 3D.
- *SURE*¹⁶[38]. Este software desarrollado en C++ por el *Institute for Photogrammetry* de la universidad de Stuttgart, utiliza un algoritmo similar al SGM [23] para obtener la nube de puntos.

Una vez obtenida la nube de puntos, ésta se limpia y se convierte en una malla, para cuyo tratamiento se puede utilizar el programa MeshLab¹⁷, muy extendido en este campo.

3.4.3. Software comercial

Existe un gran número de software comercial para fotogrametría de objeto cercano con una larga tradición en su desarrollo que puede aplicarse al tipo de trabajos del que es objeto este TFM:

- *PhotoScan*. De la empresa rusa *Agisoft*, basado en las técnicas de visión artificial anteriormente definidas, puede automatizarse casi por completo el proceso de generación de modelos 3D. Es uno de los programas que menos intervención del operador requiere.
- *Photomodeler*. Propiedad de *Eos systems*, se trata de uno de los programas más extendidos en este campo, su primera versión fue lanzada en 1994 y desde entonces ha venido implementando mejoras que lo convierten en uno de los programas mas completos.
- *Imagine Photogrammetry* (anteriormente *Leica Photogrammetry Suite*). Este conjunto de programas abarcan un gran número de aplicaciones no solo de fotogrametría de objeto cercano, sino también fotogrametría aérea o tratamiento de imágenes de satélite. Es desarrollado por la casa *Leica*.
- *ImageMaster* (anteriormente *PI3000*). Este software creado por *Topcon*, está diseñado para permitir trabajar con instrumentos de esta marca, así como con estaciones totales o los escáneres láser.
- *Australis*. Lanzado en 1997 por *Photometrix* es otra de las opciones que ofrece el mercado para este tipo de herramientas.
- *3DVEM*. Todavía en desarrollo, está diseñado en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia¹⁸ y nace como un conjunto de programas enfocados a la fotogrametría de objeto cercano.

¹⁵<http://www.micmac.ign.fr/> Vis. Febrero 2014

¹⁶<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html> Vis. Febrero 2014

¹⁷<http://meshlab.sourceforge.net/> Vis. Febrero 2014

¹⁸<http://gifle.webs.upv.es/Services.php> Vis. Febrero 2014

Existen más soluciones comerciales, aunque, como se ha dicho queda fuera del alcance del presente TFM profundizar más en ellas, resultaría interesante para el desarrollo de futuros trabajos realizar una comparativa y el análisis de la capacidad de adaptarlas a los trabajos que se pretenden desarrollar.



Propuesta

En los anteriores capítulos se han descrito las dos principales tecnologías utilizadas para obtener modelos tridimensionales de grabados rupestres en la actualidad. Sin embargo, estas soluciones están destinadas a un uso generalizado en otros ámbitos como la ingeniería inversa, arquitectura, etc.

Por contra, los trabajos desarrollados en el proyecto Tamanart, en los que se basa el presente TFM tienen unos requerimientos particulares, comenzando por una precisión mínima de 1 mm, que pueda representar de forma correcta objetos tallados en piedra u otras superficies.

La sencillez de uso, evitando la necesidad de estacionar durante largos periodos de tiempo, sin descuidar la parte económica que resulte asequible para este tipo de proyectos, son otros de los aspectos que se deben tener en cuenta.

En este capítulo se pretende ofrecer una solución basada en la fotogrametría de objeto cercano, adaptada a las necesidades de proyectos como el de Tamanart, basándose en los aspectos estudiados en el capítulo 3.

4.1. Equipo

Una de las cámaras más asequibles y que permite la utilización del software CHDK descrito en el apartado 3.1 es el modelo *Canon Powershoot A800*©, con una resolución de 10Mpx y distancia focal de entre 6.6 mm y 21.6 mm.

La propuesta del presente TFM, consiste en la utilización de varias de estas cámaras que,



Figura 4.1: Canon PowerShot A800©

realizando disparos simultáneamente puedan ser capaces de obtener modelos tridimensionales con la precisión requerida.

En cualquier caso, la elección de esta cámara está basada meramente en motivos teóricos y económicos por lo que un estudio con diferentes cámaras que analicen la precisión resultante, la variación de los IOPs a lo largo del tiempo o las posibilidades que ofrece su software resulta interesante para posteriores trabajos.

4.2. Configuración de las cámaras

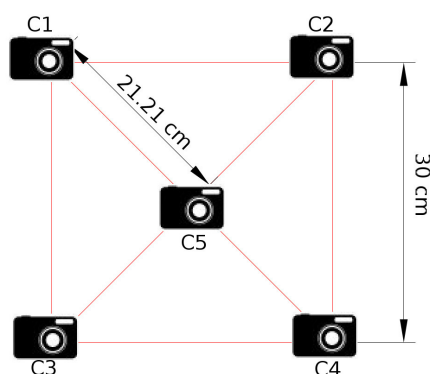


Figura 4.2: Configuración de las cámaras

En el presente TFM se propone una configuración con 5 cámaras en las que 4 forman un cuadrado con líneas base de 30 cm. entre las mismas, mientras que la cámara restante se situaría en el centro de este cuadrado, separada 21,21 cm. de las otras (figura 4.2).

Una separación de 30 cm entre cámaras requeriría tomar las fotografías a 1.70 m del objeto para un ángulo de 10° entre ejes ópticos que intersecarían en un mismo punto del plano objeto, con lo que se pretende mejorar la precisión geométrica. Sin embargo este ángulo de convergencia cambia para la cámara central, reduciéndose a la mitad, como se puede ver en la figura 4.3.

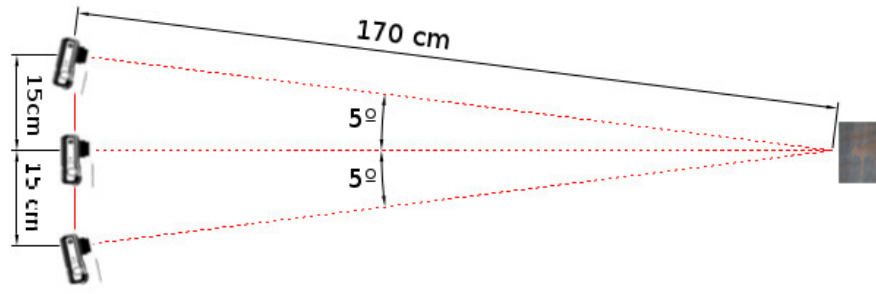
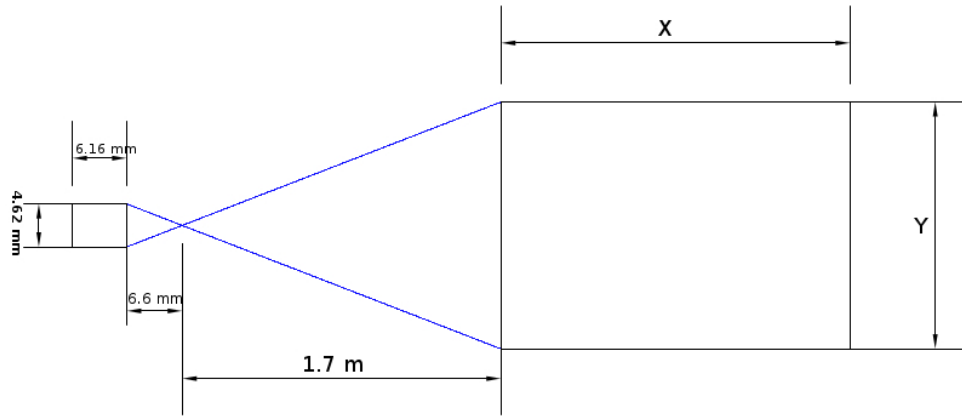


Figura 4.3: Vista cenital de las cámaras

Utilizando cámaras *Canon Powershoot A800*, podemos observar en sus especificaciones técnicas (ver apéndice A.1) un sensor de 6.16 x 4.62mm de 10 Mpx (lo que equivale a 3652 x 2739 píxeles). Empleando una distancia focal de 21.6mm:



Por tanto:

$$\begin{cases} \frac{0,00616}{0,0216} = \frac{X}{1,7} \implies X = 0,48m \\ \frac{0,00462}{0,0216} = \frac{Y}{1,7} \implies Y = 0,36m \end{cases}$$

Con lo que tenemos el tamaño de píxel a una distancia de 1.7 m para este tipo de cámara:

$$\begin{cases} \frac{0,48m}{3652p} = 0,131mm/pixel \\ \frac{0,36m}{2739p} = 0,131mm/pixel \end{cases}$$

Aunque como se ha indicado en el apartado 3.2.2 este tamaño de píxel no se corresponde con la realidad, al ser este un resultado de una interpolación de las bandas RGB. Considerando este aspecto, el tamaño del píxel podría ser aproximadamente el triple del calculado.

Por otra parte, como se puede observar en la figura 4.4, la cámara central es la única que

tendría el eje óptico perpendicular al objeto, mientras que el resto convergen al mismo punto. Uno de los problemas que podría plantear este sistema sería que podría dificultar

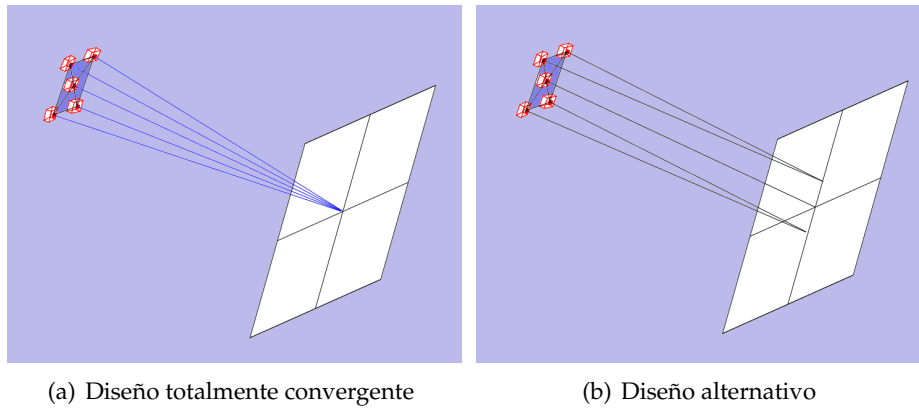


Figura 4.4: Configuración de las cámaras

la tarea de obtener las imágenes epipolares [22]. La alternativa (figura 4.4(b)) sería la convergencia entre las cámaras de una misma altura (es decir, entre C1 y C2 y entre C3 y C4) manteniéndose el resto de ejes ópticos paralelos, lo que se asemeja más al modelo 3+2 de Rau [33].

4.3. Calibración

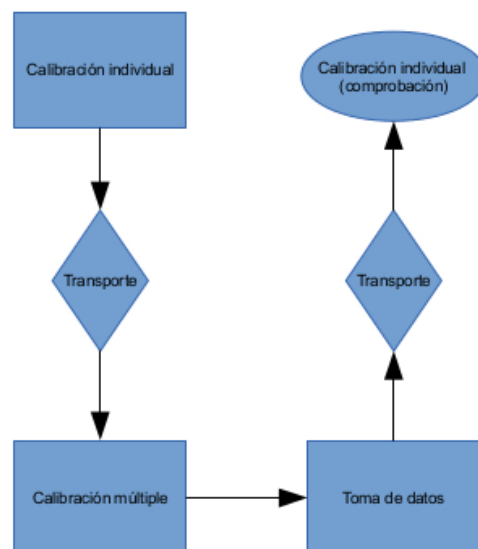


Figura 4.5: Flujo de trabajo

El flujo de trabajo para el desarrollo de una correcta calibración en el tipo de trabajos a los que se dirige el presente TFM se puede resumir acorde a la figura 4.5.

La calibración individual de todas las cámaras que forman el sensor se debe realizar antes del traslado del equipo a la región para evitar pérdidas de tiempo y el transporte excesivo de material para realizar este proceso. El método mas preciso, como se ha dicho en apartados anteriores es el de autocalibración con un gran número de puntos de apoyo.

La calibración múltiple podría realizarse una vez transportado el instrumental a la región, de esta forma las cámaras no tendrían que ir ensambladas durante todo el proceso de transporte, con la consiguiente posibilidad de variación de los EOPs por el movimiento durante el traslado. Este paso supondría tener que transportar también la placa con los puntos de apoyo necesaria para esta calibración. En función de los resultados podría considerarse la posibilidad de realizar un tipo de calibración individual ‘in situ’ utilizando puntos de control sobre la placa, quedando todo el proceso de calibración en un solo paso.

La opción alternativa sería realizar todo el proceso antes del transporte, por tanto habría que asegurarse de que el ensamblado de las cámaras se mantendría completamente fijo para evitar la variación en los EOPs, por lo que resultaría ser una opción mucho mas arriesgada.

Tras esto, únicamente restaría realizar la toma de datos y el postproceso. En cualquier caso, debido al desconocimiento sobre la variación de los IOPs que podrían darse durante todo el proceso de trabajo (por la inestabilidad en la geometría interna propia de este tipo de cámaras y a las condiciones a las que hayan sido sometidas), resultaría interesante realizar una última calibración individual en idénticas condiciones que la primera para comprobar dicha variabilidad.

4.4. Software a emplear

En este capítulo se pretende dar una guía del software que podría ser utilizado en trabajos de investigación futuros en la línea del presente TFM:

- **Calibración individual.** Para este proceso, el programa de calibración incluido en la librería OpenCV ofrece una buena solución para obtener los parámetros, fácilmente personalizable para utilizar el patrón que hemos definido previamente con un gran número de puntos de apoyo.
- **Calibración múltiple.** En este caso, para obtener los EOPs también prima la personalización y la adecuación del programa a los fines requeridos por lo que las posibilidades que ofrecen APERO y OpenCV en este sentido hacen que sean las principales opciones para llevar a cabo estos trabajos.
- **Obtención de la nube de puntos.** CMVS/PMVS2 está más extendido gracias a su implementación en la suite VisualSFM.

- **Creación de mallas y manejo de la nube de puntos.** En este aspecto, MeshLab es el software más extendido, aunque se puede destacar CloudCompare para la comparación y análisis de nubes de puntos.
- Por último se debe mencionar a Blender, para la edición de mallas en el caso de ser preciso modificar los resultados para una mejor visualización (eliminación de huecos, modificación de las texturas,...).

En cualquier caso, resultaría muy interesante realizar un estudio de los diversos programas citados en capítulos anteriores para definir cual sería el más adecuado para cada tarea en función de parámetros más objetivos (en cuanto a desempeño real, facilidad de uso, tiempo de procesamiento,...).



Pruebas

Para determinar la viabilidad de la propuesta presentada en este TFM se han llevado a cabo una serie de pruebas usando diferentes cámaras y metodologías.

Para la realización de estas pruebas se han utilizado dos cámaras diferentes.

- Una cámara tipo DSLR, modelo Canon Eos 5D Mark II con la que se ha pretendido obtener un modelo más preciso del objeto a modelar.
- Una cámara compacta, modelo Canon Powershoot A800 que se corresponde a la propuesta realizada en capítulos anteriores.

En primer lugar se ha realizado una comparativa entre los resultados obtenidos con ambas cámaras en una prueba de laboratorio, para estudiar la viabilidad de la utilización de cámaras compactas en lugar de cámaras DSLR comúnmente usadas en fotogrametría de objeto cercano.

La siguiente prueba ha consistido en la toma de fotografías de grabados rupestres en las instalaciones del Museo Arqueológico Nacional utilizando la cámara DSLR para obtener las imágenes.

En este capítulo se desgranar ambas pruebas, exponiendo la metodología empleada en cada caso y los resultados obtenidos, dejándose su valoración para capítulos posteriores.

5.1. Prueba de laboratorio

En esta prueba se ha pretendido modelar una representación de un animal tallado en pizarra natural de unas dimensiones aproximadas de 20x10 cm.



Figura 5.1: Objeto a modelar

Para el caso de la toma de fotografías con la A800 se ha utilizado el software CHDK para explotar todo el potencial que puede ofrecer la cámara.

Su instalación resulta sencilla, únicamente se debe formatear una tarjeta SD, descargar el programa y copiarlo en la tarjeta. Una vez insertada en la cámara se hace una actualización de 'firmware' y ya se puede comenzar a trabajar con las características que ofrece CHDK. En ningún momento el 'firmware' original de la cámara es modificado y una vez quitada la tarjeta SD la cámara vuelve a funcionar con el mismo.

Las fotografías se obtienen en formato RAW y posteriormente se transforman a formato JPEG (o TIFF), únicamente aplicando un filtro VNG. Para ello se utiliza el programa UFRAW¹ que permite la manipulación de este tipo de imágenes.

La elección del formato de salida, JPEG o TIFF, varía en función de las necesidades de nuestro proyecto. Para un manejo más dinámico de archivos, el formato JPG, al tratarse de un formato clásico de compresión nos permitirá una mayor fluidez y ahorro de memoria en el caso de no disponer de un equipo con una gran capacidad. En este caso el nivel de compresión se fija al 100 % para reducir la pérdida de información.

El formato TIFF sin embargo, requiere una mayor capacidad de memoria a cambio de obtener imágenes sin pérdida en la compresión² y con una profundidad de color de 16

¹<http://ufraw.sourceforge.net/>

²Para la compresión sin pérdida en el formato TIFF se utiliza el algoritmo LZW(<http://es.wikipedia.org/wiki/LZW>)

bits (por 8 bits de las imágenes en JPEG).

Por otra parte, se han obtenido las mismas imágenes en el formato JPG con las transformaciones que aplica la propia cámara para comparar los resultados.



Figura 5.2: Comparativa de la misma fotografía en formato RAW (derecha) y con los filtros aplicados por la cámara Canon PowerShoot A800(izquierda)

Como se puede observar en la figura 5.2, estéticamente resultan más efectivos los filtros utilizados en la imagen JPEG que proporciona la cámara, sin embargo, la imagen RAW contiene más información radiométrica, como se ha explicado en el capítulo 3.2.2.

Aunque las imágenes se obtienen con una sola cámara, se utiliza un trípode con el que se trata de realizar la toma con una configuración lo más similar posible a la propuesta realizada, esto es, a una distancia aproximada del objeto de 1,70m y con la distancia entre cámaras expuesta en 3.2 y con una distancia focal de 21,6mm.

Uno de los primeros problemas que se pueden observar está relacionado con esta distancia focal. Al tratarse de una cámara compacta, la focal con la que se enciende la misma es la mas corta (6,6mm) debiéndose hacer zoom para obtener la mas larga (de 21,6mm). Esto puede representar una fuente de error que disminuya la efectividad de la calibración que se va a realizar, al variar en cada encendido y apagado los IOPs.

Una posible solución sería la realización de la calibración de la cámara 'in situ' como se ha explicado en el apartado 3.3.1. En el caso de esta prueba, se optó por realizar las fotografías para obtener la autocalibración en primer lugar e inmediatamente (sin apagar ni mover la distancia focal de la cámara) realizar la toma de fotografías del objeto.

5.1.1. Calibración

Para la calibración de la cámara se toman un total de 16 fotografías, desde 8 puntos de vista alrededor del patrón correspondiente. Este patrón tiene un tamaño similar al del objeto que se va a modelar y la cámara se sitúa aproximadamente a la distancia a la que se va a realizar la prueba.

Aunque, como se ha visto en capítulos anteriores, existen numerosos programas que permiten extraer los parámetros de la cámara, se ha utilizado el que proporciona la suite Photomodeler, al ser la que se va a utilizar a lo largo de todo el proceso. Los parámetros que extrae cualquier programa de este tipo deben ser los mismos, la elección de éste en concreto es por simple comodidad para utilizar un marco común en el que se van almacenando los datos con los que se trabaja (la suite Photomodeler, en este caso).

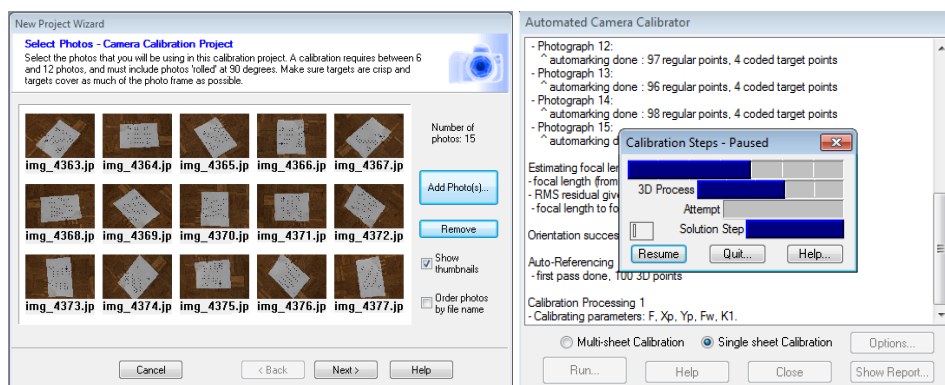


Figura 5.3: Proceso de calibración con Photomodeler

Al realizarse la prueba con una única cámara no existe una calibración múltiple, sino una orientación relativa que el programa realiza a partir de los puntos homólogos.

5.1.2. Orientación Relativa

En Photomodeler la búsqueda de puntos homólogos para la orientación relativa se puede realizar de diferentes formas:

- De forma manual, insertando los puntos uno a uno en cada fotografía.
- De forma automática, utilizando puntos codificados sobre el terreno, de manera que el programa los identifique sin necesidad de interacción de un operador.
- De forma automática, con la herramienta SmartPoints, que utiliza un algoritmo de identificación de puntos homólogos similar a los que se han explicado en el capítulo [3.4.1](#).

La utilización de este tipo de algoritmo supone un gran ahorro de tiempo y carga de trabajo para el operador, obteniendo un gran número de puntos homólogos en todas las fotografías en un corto espacio de tiempo.

Además, se obtienen unos buenos resultados, aunque debe realizarse un análisis de los mismos para asegurarse de eliminar los errores groseros que se puedan producir, usando la herramienta que proporciona el software para el análisis estadístico de los 'Smart-Points' creados para el ajuste.

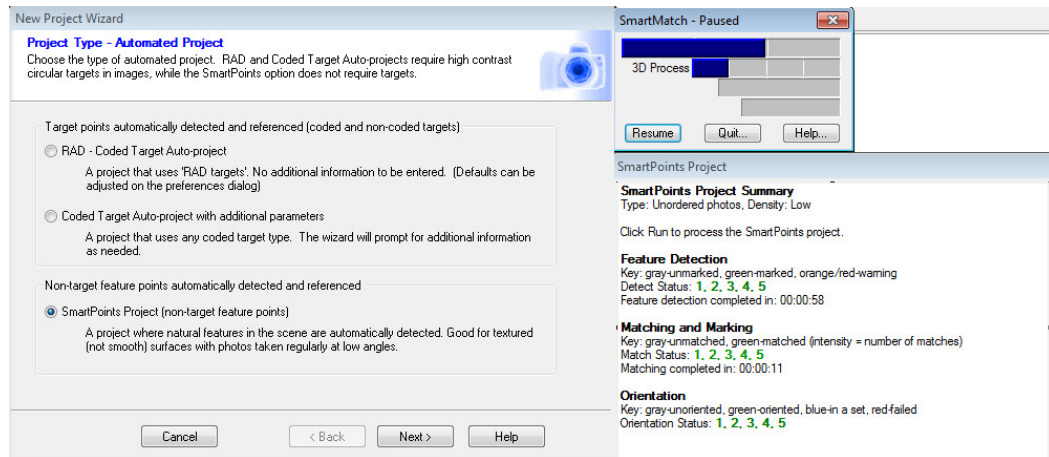


Figura 5.4: Identificación de puntos homólogos con SmartPoints

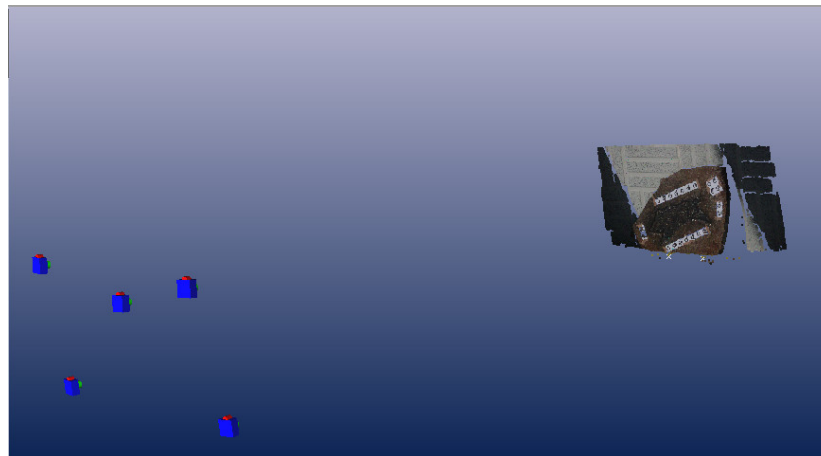


Figura 5.5: Resultado de la orientación relativa

Una vez eliminados los errores groseros y realizada la orientación relativa se escala el modelo. Para ello basta con tener dos puntos de distancias conocidas que se puedan identificar en varias imágenes. En el caso de esta prueba se han utilizado puntos codificados (sobre los que se ha medido su separación) y una cinta métrica, ambos situados próximos al objeto a modelar. Los puntos codificados son identificados automáticamente por el programa mientras que sobre la cinta métrica debe hacerse manualmente en todas las fotografías.

Con el modelo escalado, se pueden realizar medidas sobre el mismo además de obtener precisiones en coordenadas absolutas de manera que se puedan comparar con otros modelos (en el caso de esta prueba, entre las dos cámaras).

Tras realizar este trabajo se procesa el ajuste, que debe tener una precisión final inferior al píxel, y con ello se puede pasar a la obtención de la nube de puntos.

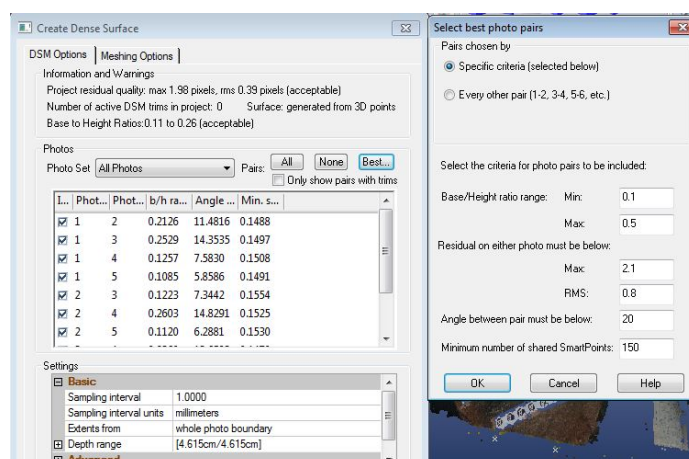


Figura 5.6: Obtención de la nube de puntos en Photomodeler

5.1.3. Obtención de la nube de puntos

La nube de puntos se obtiene a través de un algoritmo MVS como los detallados en 3.4.1. El software permite identificar zonas de búsqueda sobre las que se centrará la identificación de puntos, obviando las partes de la imagen que no contengan el modelo. Esta tarea supone un ahorro considerable en el tiempo de procesamiento del algoritmo, que se puede prolongar durante varios minutos.

Asimismo, se debe ajustar el tamaño de muestreo, en el caso de esta prueba inferior al milímetro, que repercutirá en el número de puntos obtenido y la en calidad de la malla que se obtenga a partir de estos.

Por otra parte, la elección de los pares de fotografías a utilizar será uno de los principales factores que repercutirá en la calidad de los puntos obtenidos. Photomodeler tiene filtros que ayudan a la elección de los pares en función de:

- El número de puntos homólogos entre las imágenes.
- El Error Medio Cuadrático (RMS) y el mayor error de los puntos homólogos.
- La relación 'Base to Radio' (B/R) y el ángulo entre las posiciones de la cámara en el momento de la toma de cada fotografía, obtenido a partir de la orientación relativa.

Además de todo ello, se debe analizar cada par detenidamente e identificar los pares que mejor se ajusten al modelo que se quiere obtener.

5.1.4. Resultados y comparativa

Para la cámara Canon Eos 5D, cuyos resultados se toman como referencia al ser la más precisa, se ha tomado un mayor número de fotos para que exista una mayor versatilidad a la hora de elegir las que se utilizan para obtener la nube de puntos.

En el caso de la cámara Canon Powershoot A800 se ha utilizado el diseño de la propuesta detallada en el capítulo 4.2 para comprobar su viabilidad.

Datos de la Orientación Relativa		
<i>Cámara</i>		
Modelo	Canon EOS 5D Mark II	Canon PowerShoot A800
Focal	85 mm	21.6 mm
Número de imágenes	10	5
Software	Photomodeler Scanner	Photomodeler Scanner
<i>Precisiones</i>		
Residuales (EMC)	0.648 píxeles	0.387 píxeles
Precisiones de los puntos		
EMC	0.028 cm	0.0459 cm
Máximo	0.0665 cm	0.0794 cm
Mínimo	0.00512 cm	0.0222 cm
<i>Relación B/R</i>		
Media	0.2220	0.1736
Máximo	0.3277	0.2603
Mínimo	0.1539	0.1085
Nube de puntos		
Distancia de muestreo	0.4 mm	1 mm
Número de puntos	7.191.851	3.624.672
Nº Pares utilizados	17	10

Cuadro 5.1: Resumen de la prueba

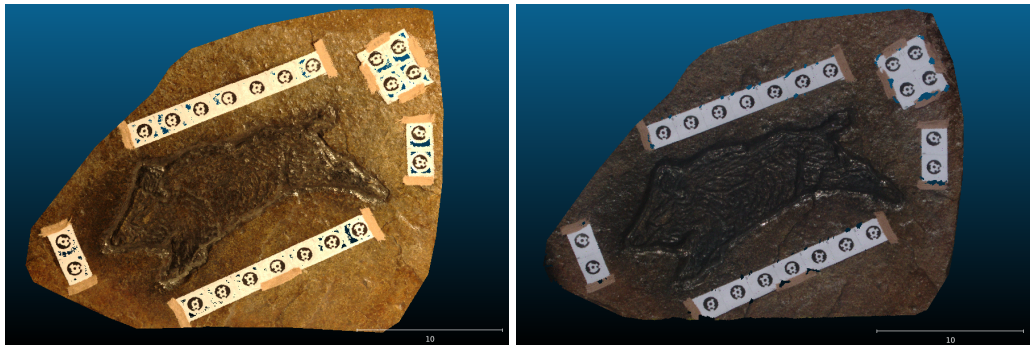


Figura 5.7: Recorte de las nubes de puntos obtenida con las cámaras Eos 5D(izquierda) y A800(derecha)

En ambos casos se ha seguido el procedimiento detallado en el presente capítulo y se ha utilizado luz natural directa como fuente de iluminación.

El tiempo empleado en la toma de datos con cada cámara fue de aproximadamente 45 minutos, mientras que la calibración y procesado de las imágenes tuvo una duración de entre 5 y 6 horas, aunque esto último puede reducirse con un ordenador mas potente.

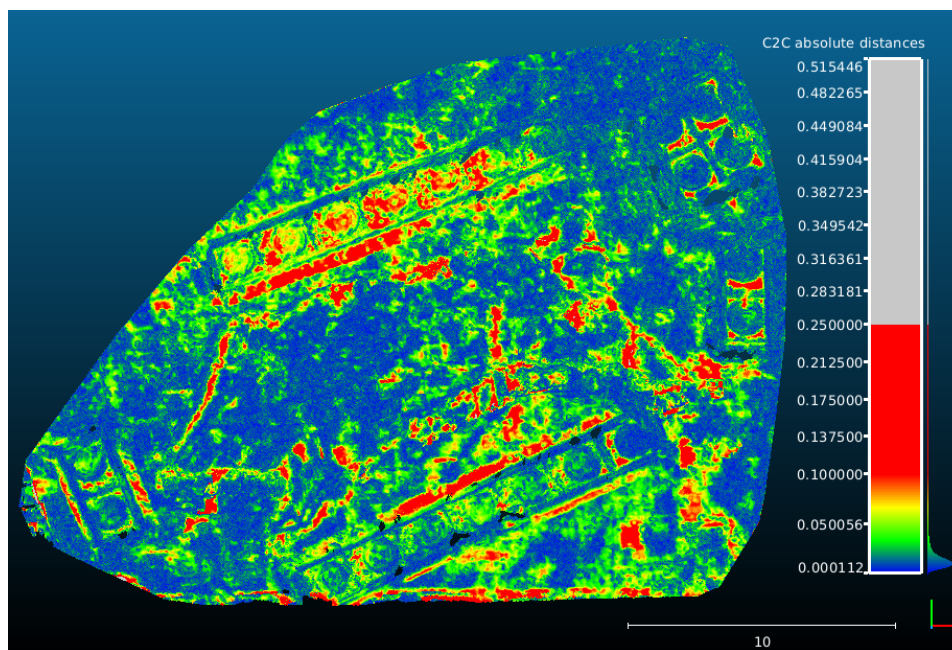


Figura 5.8: Diferencias entre los recortes de la figura 5.7 (datos en centímetros)

Para el análisis de los resultados se ha utilizado el programa CloudCompare ³ bajo licencia GPL (software libre), que nos permite la comparación de varias nubes de puntos diferentes, alineándolas, segmentándolas y observando las distancias que las separan.

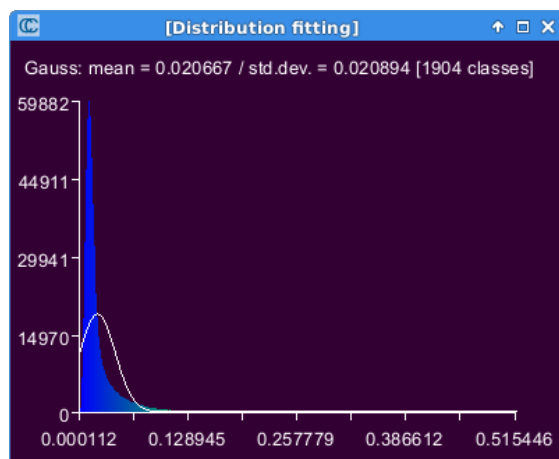


Figura 5.9: Histograma de las diferencias entre los recortes de las dos nubes de puntos (datos en centímetros)

Como se puede observar en la figura 5.8, existen algunas zonas (coloreadas en rojo) en las que las diferencias entre puntos de ambas nubes se encuentran entre 1 y 2.5mm. Sin embargo la mayoría no varían más de 0.5mm (en azul y verde) y el número que supera los 2.5mm se puede considerar residual.

³<http://www.cloudcompare.org/> Vis. Junio 2014

5.2. Medición de grabados en el Museo Arqueológico Nacional

A pesar de contar con un dibujo tallado en piedra, la anterior prueba tiene como objetivo principal comprobar las diferencias de precisión existentes entre los resultados obtenidos por una cámara compacta utilizando la metodología propuesta y por una cámara reflex realizando múltiples tomas.

Para comprobar la viabilidad de la utilización de la fotogrametría de objeto cercano en grabados rupestres reales se realizó la toma de datos sobre algunas de las piezas de las que dispone el Museo Arqueológico Nacional. Utilizando en esta ocasión la cámara Canon EOS Mark II 5D (apéndice A.2) con objetivos de 85, 50 y 35 mm. De esta manera, se combinan la utilización de estos objetivos con el fin de obtener una comparativa de los resultados que pueden ofrecer.



Figura 5.10: Ídolos placa

En concreto se analizaron 4 piezas diferentes: 3 ídolos placa ⁴ y 1 tallado en hueso. Para ello se utilizó un soporte cuadriculado sobre fondo negro sobre el que se dispusieron las piezas. Dicho soporte disponía también de 4 focos auxiliares que permiten una distribución de luz uniforme sobre las piezas. Sin embargo, al tratarse de objetos oscuros se utiliza una hoja de papel que ofrezca un mayor contraste.

El principal escollo para una correcta disposición de las tomas fue el tamaño de la mesa de laboratorio en la que se obtuvieron, que impedía cubrir todos los ángulos alrededor de las piezas. De este modo, la distribución de las tomas se dividió en dos, en la parte posterior y anterior de la mesa de trabajo, realizándose un total de 8 fotografías por pieza y objetivo.

⁴Sus referencias se pueden encontrar en <http://research2.its.uiowa.edu/iberian/>



Figura 5.11: Hueso tallado

Por otra parte, en este caso se utilizó el software Agisoft Photoscan para obtener los resultados y se realizó una calibración para todos los objetivos antes de tomar los datos con cada uno de ellos. Para esta tarea se volvió a utilizar el programa Photomodeler Scanner, de modo que para insertar los IOPs correspondientes en Photoscan se utilizó el programa Agisoft Lens con el objetivo de adaptar el formato de los mismos. Así se pretende analizar los resultados ofrecidos por este software y las ventajas que se pueden obtener con su uso frente al utilizado en la prueba anterior (Photomodeler Scanner).

5.2.1. Calibración

La calibración de cada objetivo se realizó antes de la toma de datos con el mismo, de una manera similar a la explicada en el apartado 5.1.1. Se obtienen 16 fotografías por cada objetivo de un patrón proporcionado por el software utilizado en este proceso (Photomodeler Scanner), que tiene un tamaño aproximadamente similar a los objetos que se van a modelar.

Tras obtener los IOPs de la cámara (y su correspondiente objetivo), calculados con el software Photomodeler Scanner, se utiliza Agisoft Lens, que permite traducir estos parámetros a un formato que equivalente al que utiliza el programa que se usará para la obtención de la nube de puntos (Agisoft Photoscan).

5.2.2. Toma de datos

En el caso de las placas se procedió de manera diferente en cada una de ella:

- Placa 2: Se utilizaron los 3 objetivos, obteniéndose un total de 34 fotografías, con posiciones aleatorias en la toma de cada objetivo, para comprobar la capacidad del



Figura 5.12: Toma de datos en el MAN

software para obtener modelos 3D a partir de diferentes cámaras sin una programación de las tomas adecuada.

- Placa 3: Se utilizaron 2 objetivos (los de 50 y 35mm), obteniéndose un total de 34 fotografías, posicionándose aproximadamente en los mismos puntos de toma con ambos objetivos.
- Placa 1. Se utilizó únicamente el objetivo de 50mm, obteniéndose un total de 16 fotografías.

Para la pieza tallada en hueso se procedió de manera similar a la placa 3 utilizando los mismos 2 objetivos y posiciones de toma. El principal problema del hueso reside en la imposibilidad de conseguir un modelo 3D del objeto completo sin cambiar la posición del mismo, de modo que es necesario realizar varios modelos y unirlos posteriormente, con el consiguiente aumento del tiempo de procesado.

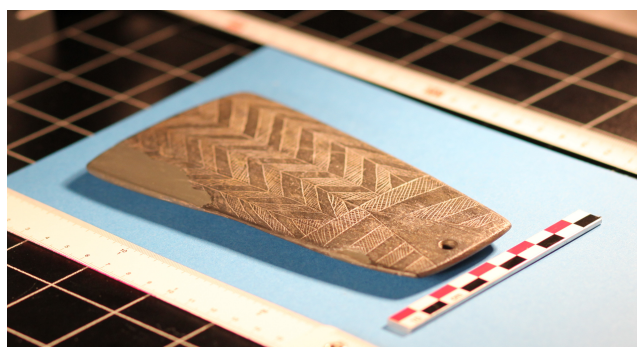


Figura 5.13: Fotografía tomada con objetivo de 85mm

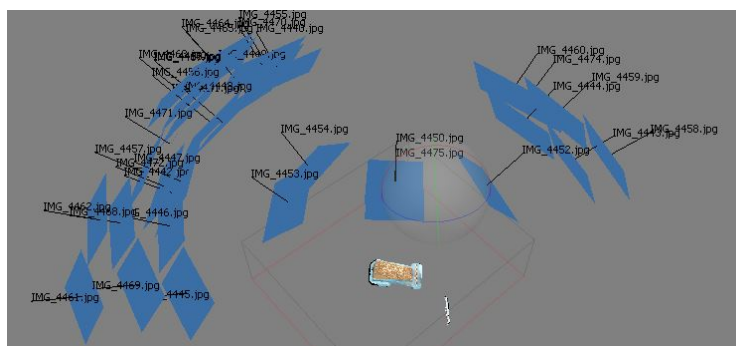


Figura 5.14: Disposición de las tomas para el Ídolo placa 2

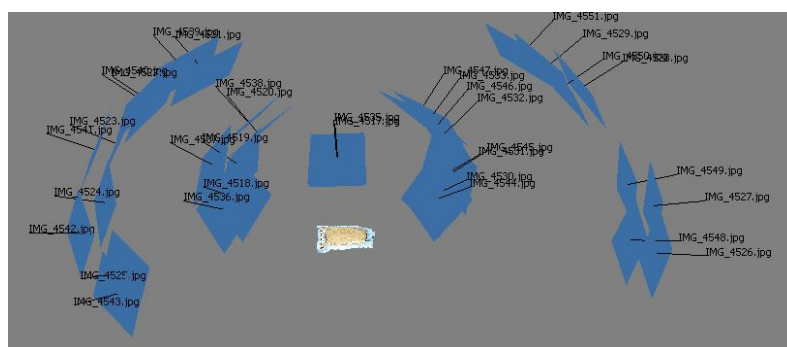


Figura 5.15: Disposición de las tomas para el Ídolo placa 3

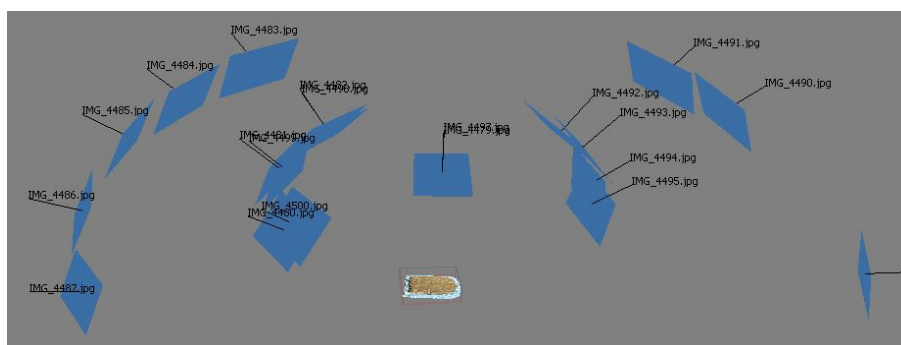


Figura 5.16: Disposición de las tomas para el Ídolo placa 1

5.2.3. Obtención de la nube de puntos

La obtención de nubes de puntos con Agisoft Photoscan resulta un procedimiento mucho mas automatizado que en el de otros software de este tipo (concretamente en el utilizado anteriormente, Photomodeler Scanner).

El proceso consiste únicamente en cargar las imágenes, introducir los parámetros de calibración de las cámaras (y sus correspondientes objetivos), mientras que los procesos de orientar y obtener la nube de puntos no necesitan ningún tipo de supervisión del operador, únicamente escoger la calidad de cada ajuste, que en ningún caso es un parámetro numérico sino más bien subjetivo (baja, media, alta, extra).

El tiempo de procesamiento que exige el programa es aproximadamente similar al de Photomodeler Scanner, aunque como en el caso de este software, se puede reducir empleando un equipo informático mas potente.

El problema que puede presentar esta facilidad de procesamiento es precisamente la falta de control sobre precisiones de la orientación, puntos homólogos,... por lo que sería interesante un análisis más pormenorizado del software y los errores groseros o sistemáticos que puede producir así como su comparativa con otros software.

5.2.4. Resultados y comparativa

Datos de los modelos 3D obtenidos				
<u>Ídolo Placa 1</u>				
<i>Objetivo</i>	<i>Nº Fotos</i>	<i>Nª Puntos</i>	<i>Nº Caras</i>	<i>Nº Vértices</i>
85 mm	0	-	-	-
50 mm	17	568.000	-	-
35 mm	0	-	-	-
Total	17	568.000	179.999	90.446
<u>Ídolo Placa 2</u>				
<i>Objetivo</i>	<i>Nº Fotos</i>	<i>Nª Puntos</i>	<i>Nº Caras</i>	<i>Nº Vértices</i>
85 mm	10	103.000	-	-
50 mm	14	148.000	-	-
35 mm	10	85.000	-	-
Total	34	336.000	180.000	90.530
<u>Ídolo Placa 3</u>				
<i>Objetivo</i>	<i>Nº Fotos</i>	<i>Nª Puntos</i>	<i>Nº Caras</i>	<i>Nº Vértices</i>
85 mm	0	-	-	-
50 mm	17	926.000	-	-
35 mm	17	390.000	-	-
Total	34	1.316.000	179.999	90.534
<u>Hueso</u>				
<i>Objetivo</i>	<i>Nº Fotos</i>	<i>Nª Puntos</i>	<i>Nº Caras</i>	<i>Nº Vértices</i>
85 mm	0	-	-	-
50 mm	15	1.129.273	-	-
35 mm	16	469.705	-	-
Total	31	1.598.978	222.449	112.511

Cuadro 5.2: Modelos 3D obtenidos

Por la cantidad de puntos obtenidos podemos observar que el más adecuado para la distancia a la que se tomaron las fotografías (unos 60 cm) es el objetivo de 50mm. Obviamente las fotografías tomadas con el objetivo de 85mm ofrecen un mayor detalle, sin embargo solo nos permiten enfocar a una parte de la fotografía (figura 5.13). Una solución sería realizar varios enfoques desde la misma posición y luego utilizar máscaras en Photoscan para usar solo la zona enfocada aunque esto incrementaría el número de

fotografías y el tiempo procesado de las mismas.

Aunque la profundidad del tallado es realmente pequeña, se pueden distinguir muchos de los dibujos presentes en las piezas sin la necesidad de añadir textura al modelo, aunque con la misma, evidentemente, los resultados se puede distinguir al completo.

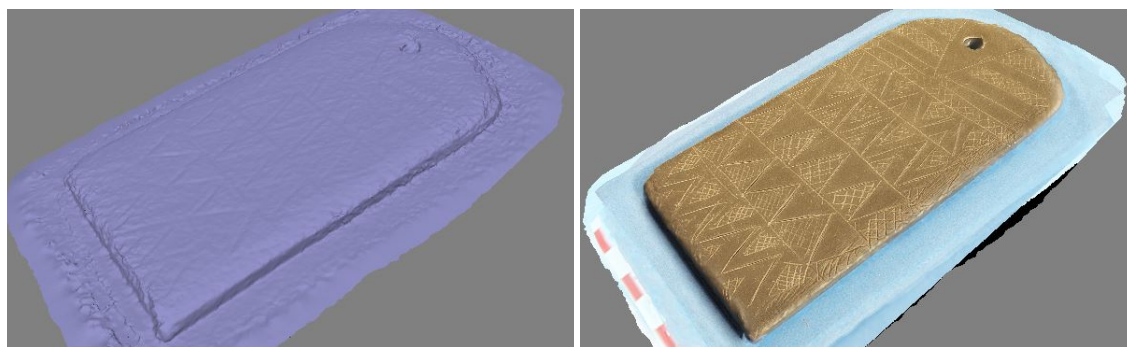


Figura 5.17: Ídolo placa 1

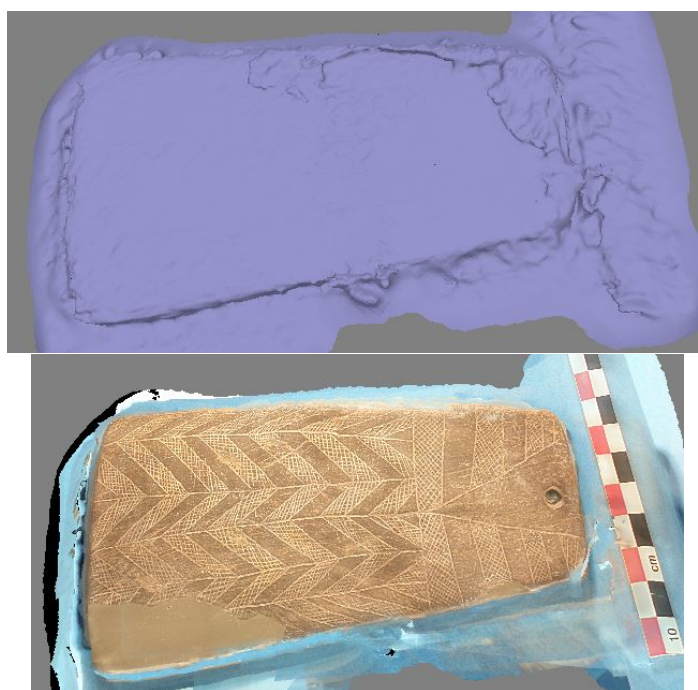


Figura 5.18: Ídolo placa 2

En el caso del ídolo placa 2 (figura 5.18) algunas de las fotografías de la parte posterior no se obtuvieron con la calidad necesaria, por lo que no se incluyeron en el procesado de datos y esa parte tiene un menor detalle en esta pieza.

Estas deficiencias vienen provocadas, como se mencionó anteriormente, por el empleo del objetivo de 85mm y la dificultad de enfoque con el mismo a una distancia tan corta.

Sin embargo, este objetivo resulta ideal para obtener fotografías de detalle en las que necesitemos una mayor densidad de puntos para caracterizar una parte del objeto como

se puede observar en la figura 5.19 en la que a partir de varias fotografías tomadas con el objetivo de 85 mm. y enfocadas a una zona del objeto se obtiene un mayor detalle de dicha zona.

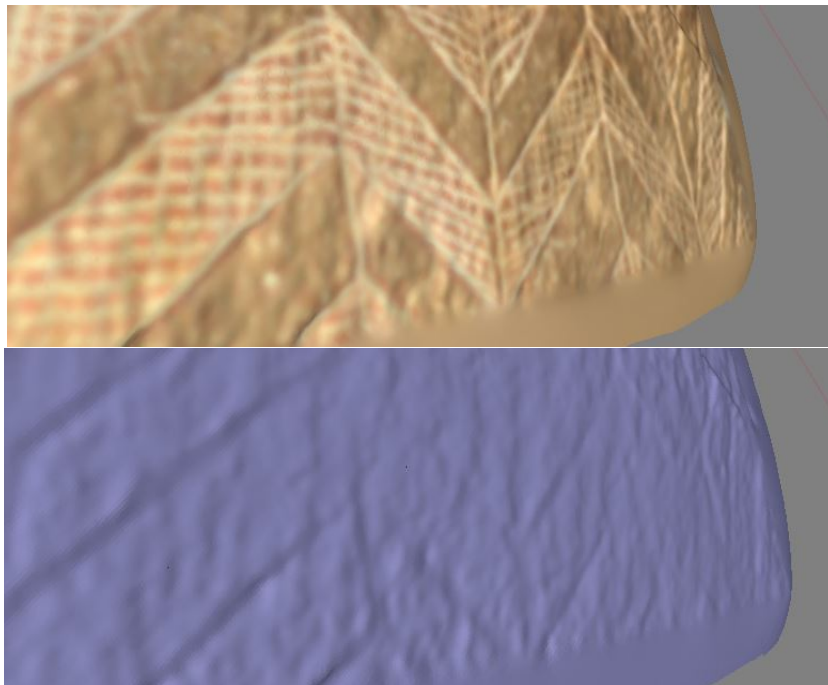


Figura 5.19: Ídolo placa 2. Detalle de una zona del modelo 3D creado a partir de fotografías tomadas con el objetivo de 85mm.



Figura 5.20: Ídolo placa 3

Como se puede observar el ídolo placa 3 (figura 5.20) es el que ofrece una mayor densidad de puntos, al emplear dos objetivos con un enfoque que cubre correctamente toda la pieza. Sin embargo, por el tamaño del píxel menor que ofrece el objetivo de 35mm, la precisión presumiblemente similar al resultado que se obtiene para el ídolo placa 1 (figura 5.17), que utiliza como único objetivo el de 50mm.



Figura 5.21: Ortofotografías de los ídolos placa

Otras de las soluciones que se pueden realizar son ortofotografías de los objetos como las de la figura 5.21

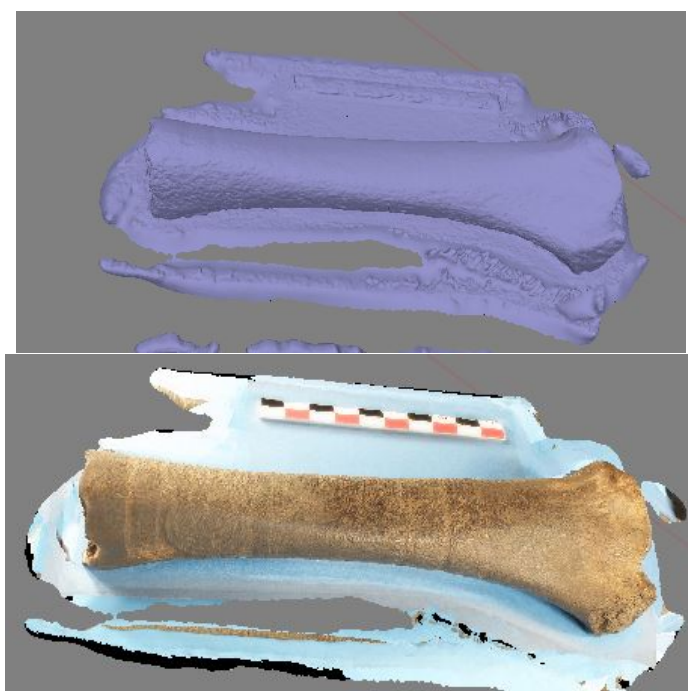


Figura 5.22: Hueso tallado

El hueso (figura 5.22) ofrece la dificultad, explicada anteriormente, de la imposibilidad de realizar el modelado 3D completo sin mover el objeto por lo que en esta prueba únicamente se modeló la parte frontal del mismo.

Si se hubiesen realizado tomas con el objeto en diferentes posiciones podría realizarse un mezclado de las mallas creadas con software como CloudCompare, Meshlab o Blender, con lo que se obtendría el modelo completo.



Conclusiones y trabajo futuro

Tras haber documentado las diferentes técnicas utilizadas para la documentación y obtención de modelos tridimensionales de petroglifos, proponer una metodología para el uso de una de estas técnicas y después de ponerla a prueba, se pueden obtener una serie de conclusiones y recomendaciones para futuros estudios relacionados con el presente TFM.

La prueba de laboratorio ofrece diferencias entre los resultados de las dos cámaras, superiores a 1 mm en varias zonas del modelo a representar, que podrían indicar la necesidad de utilizar una cámara compacta que ofrezca una calidad superior a la usada en esta prueba.

Otro de los aspectos de relevancia en este ensayo es la necesidad de adecuar el proceso de calibración para cámaras compactas con zoom, cuya focal varía al apagarse y encenderse. En estos casos, los parámetros de calibración varían en cada proceso de encendido, por lo que habría que estudiar la necesidad de realizar calibraciones in situ en lugar de hacer una calibración previa en laboratorio. Para ello, resultaría adecuado un estudio de la variación de los IOPs en cada encendido/apagado en la cámara a utilizar.

En la prueba realizada en el MAN se comprobó la calidad de los modelos que puede llegar a ofrecer el empleo de fotogrametría de objeto cercano y su idoneidad incluso con piezas como las analizadas, donde el tallado apenas tiene hendidura.

El presente TFM tiene un carácter profundamente teórico y deja abiertas muchas posibilidades para el desarrollo de estudios que clarifiquen de una forma más empírica una

forma correcta de llevar a cabo la toma de datos en campo para la modelización de petroglifos.

Para un análisis más exhaustivo de las precisiones que pueden ofrecer las metodologías explicadas en este TFM sería adecuado la utilización de sistemas láser tracker con palpador 3D o similares que definan un modelo de referencia con una incertidumbre inferior a $1\mu\text{m}$. De esta forma se podrían realizar comparativas más adecuadas de las soluciones que puede ofrecer cada método.

En el ámbito del sensor fotogramétrico diseñado, como se ha comentado en el apartado correspondiente, la cámara escogida condicionará en gran medida el desarrollo de los trabajos, con lo que un análisis más pormenorizado de las posibilidades que ofrece el mercado resultaría de gran utilidad para determinar cuál resulta más adecuada.

En este análisis, uno de los aspectos más interesantes es la estabilidad de los parámetros internos de la cámara y cómo éstos varían con el transporte del instrumental. Aunque ya existen trabajos de este tipo que pueden servir de referencia [22], se centran en un pequeño grupo de cámaras, pudiendo ser oportuno para realizar un estudio objetivo en función de la marca y el tipo de cámara.

La configuración de las cámaras es uno de los aspectos que más influyen en la precisión de los resultados obtenidos, con lo que convendría experimentar con la posibilidad de utilizar otras disposiciones de cámaras como se ha indicado en otros estudios similares [33]. También la convergencia de las cámaras, descrita en el apartado 4.2, es otra de las líneas de investigación futuras.

La calibración es un aspecto importante para obtener unos resultados apropiados. La posibilidad de realizar el procesado de las imágenes de una forma más automatizada, utilizando técnicas como 'Structure from motion' frente a la obtención de los parámetros de orientación externa de forma previa mediante una calibración múltiple y el coste en relación a la precisión frente al ahorro de tiempo es otro de los aspectos a tener en cuenta en futuros trabajos.

Una de las primeras observaciones que se puede hacer tras las pruebas realizadas es la diferencia entre el procesado de las imágenes en formato RAW y en formato JPG de la cámara. Aunque ya existen estudios en este sentido, como se ha comentado en el correspondiente capítulo del presente TFM, podría resultar conveniente realizar un análisis de estas diferencias, tanto en calidad de los resultados como en tiempo de proceso de las imágenes (ya que una imagen sin pérdida por compresión también equivale a un mayor tamaño y consecuentemente mayor tiempo de procesamiento).

Finalmente, resultaría interesante realizar una comparativa detallada, con pruebas de laboratorio y en campo, entre los dos tipos de tecnología estudiados (fotogrametría de objeto cercano y escáneres de luz estructurada) enfrentando parámetros de precisión y variables económicas.

Bibliografía

Bibliografía

- [1] F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, V. Tsioukas, G. Pavlidis y A. Koutsoudis. «Towards a Versatile Handheld 3D Laser Scanner». En: 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology & Cultural Heritage. Dresden (Germany), sep. de 2006.
- [2] G. Babbar, P. Bajaj, M. Gogna y A. Chawla. «Comparative study of image matching algorithms». En: *International Journal of Information Technology and Knowledge Management* 2.2 (dic. de 2010).
- [3] P. T. Baker e Y. Aloimonos. «Calibration of a Multicamera Network». En: *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop* 7 (jun. de 2003). ISSN: 1063-6919.
- [4] J. Cardenala, E. Mata, P. Castroa, J. Delgadoa, M. A. Hernandeza, J. Pereza, M. Ramos y M. Torresa. *Evaluation of a digital non metric camera (canon d30) for the photogrammetric recording of historical buildings*. Inf. téc. Jaen: Universidad de Jaen, 2004.
- [5] J. H. Chandler, J. G. Fryer y H. T. Kniest. «Non-invasive three-dimensional recording of aboriginal rock art using cost-effective digital photogrammetry». En: *Rock Art Research* 22 (2005).
- [6] CHDK Wiki. Feb. de 2014. URL: <http://chdk.wikia.com/wiki/CHDK>.
- [7] J. Chen, X. Li, X. Wu y M. Y. Wang. «3D shape modeling using a self-developed hand-held 3D laser scanner and an efficient HT-ICP point cloud registration algorithm». En: *Optics & Laser Technology* 45 (2013).
- [8] T. Clarke y J. Fryer. «The development of camera calibration methods and models». En: *Photogrammetric Record* 16.91 (1998).
- [9] M. M. Cornellà, A. Lemjidi, A. Oumouss, G. T. Colell, R. M. Mijares, M. S. Delgado, J. M. B. Torrón, D. J. Espartero y col. *Proyecto Tamanart*. Inf. téc. Universidad Nacional de Educación a Distancia – Centre National du Patrimoine Rupestre, 2013.
- [10] M. P. Deseilligny e I. Clery. *APEROS, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images*. Inf. téc. France: Institut Géographique National, mar. de 2011.

- [11] C. S. Fraser. «Automatic camera calibration in close-range photogrammetry». En: mar. de 2012.
- [12] M. Fraštia. «Possibilities of using inexpensive digital cameras in applications of close-range photogrammetry». En: *Slovak Journal of civil engeneering* (2005).
- [13] J. Fryer, I. Dowman, A. Gruen y col. *Close range photogrammetry and machine vision*. Ed. por K. Atkinson. Scotland, Uk: Whittles Publishing Services, 2001. ISBN: 1-870325-73-7.
- [14] Y. Furukawa y J. Ponce. *High-Fidelity Image-Based Modeling*. Inf. téc. Feb. de 2006.
- [15] J. L. L. García y J. M. B. Tarongers. *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. Sep. de 2008.
- [16] A. Georgopoulos, A. Valanis y C. Ioannidis. «Assessing the performance of a structured light scanner». En: *Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement Techniques XXXVIII* (2010).
- [17] M. Gil, J. Ortiz, S. Martínez, T. Rego y B. Vazquez. «The detection of petroglyphs through digital image processing. The particular case of the stone inside the chapel of Saint Bartolomé (Lugo-Spain)». En: *International conference on Innovative Methods in Product Design*. Jun. de 2011.
- [18] P. Grussenmeyer y O. A. Khalil. «A comparison of photogrammetry software packages for the documentation of buildings». En: France, sep. de 2000.
- [19] M. Guerrero. «A Comparative Study of Three Image Matcing Algorithms: Sift, Surf, and Fast ». Tesis doct. Utah State University, 2011.
- [20] P. Hébert. «A Self-Referenced Hand-Held Range Sensor». En: *3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on* (2001).
- [21] J. Heikkilä y O Silven. «A four-step camera calibration procedure with implicit image correction». En: (1997).
- [22] M. Heinrichs, O. Hellwich y V. Rodehorst. «Robust spatio-temporal feature tracking». En: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII* (2008).
- [23] H. Hirschmuller. «Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information». En: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 30.2 (feb. de 2008). ISSN: 0162-8828.
- [24] I. Jazayeri, C. Fraser y S. Cronk. «Automated 3d object reconstruction via multi-image close-range photogrammetry». En: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII* (2010).
- [25] S. Jecic y N. Drvar. «The Assessment of Structured Light and Laser Scanning Methods in 3D Shape Measurements». En: *4th International Congress of Croatian Society of Mechanics* (sep. de 2003).

- [26] L. Koessler, L. Maillard, E. Ternisien y T. Cecchin. «3D handheld laser scanner based approach for automatic identification and localization of EEG sensors». En: 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS. Buenos Aires, sep. de 2010.
- [27] P. Kühmstedt, I. Schmidt, C. Bräuer-Burchardt y col. «Hand Held 3D Sensor for Documentation of Fossil and Archaeological Excavations». En: *O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III* (2011).
- [28] S. Laguela, M. Solla, P. Arias, F. Carrera, J. Armesto y B. Riveiro. *New approaches for 3d documentation of petroglyphs in the northwest of the iberian peninsula*. Inf. téc. University of Vigo, sep. de 2011.
- [29] S. Lemes y N. Zaimovic-Uzunovic. «Study Of Ambient Light Influence On Laser 3D Scanning ». En: *7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies ICIT & MPT* (2009).
- [30] D. G. Lowe. « Object recognition from local scale-invariant features». En: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2* (1999).
- [31] H.-G. Maas. «Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques». En: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (dic. de 1999).
- [32] A. Ranganathan. *The Levenberg-Marquardt Algorithm*. Inf. téc. Jun. de 2004.
- [33] J.-Y. Rau y P.-C. Yeh. «A Semi-Automatic Image-Based Close Range 3D Modeling Pipeline Using a Multi-Camera Configuration». En: *Sensors* (ago. de 2012).
- [34] F. Remondino. «Image-based modeling for object and human reconstruction». Tesis doct. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2006.
- [35] F. Remondino y C. Fraser. «Digital camera calibration methods: considerations and comparisons». En: *V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (sep. de 2006).
- [36] D. Robertson y R. Cipolla. «Structure from Motion». En: *Practical Image Processing and Computer Vision*. Australia: John Wiley & Sons, Limited, 2009. Cap. 13. URL: <http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>.
- [37] C. Rocchini, P. Cignoni, R. Scopigno, P. Pinci y C. Montani. «A low cost 3D scanner based on structured light». En: *EUROGRAPHICS* 20 (2001).
- [38] M. Rothermel, N. Haala, D. Fritsch y K. Wenzel. *SURE: Photogrammetric surface reconstruction from imagery*. Inf. téc. Alemania: University of Stuttgart, dic. de 2012.
- [39] C. Stamatopoulos, C. Fraser y S. Cronk. «Accuracy aspects of utilizing raw imagery in photogrammetric measurement». En: *International Archives of the Photogrammetry XXXIX-B5* (sep. de 2012).

- [40] T. Svoboda, D. Martinec y T. Pajdla. «A Convenient Multi-Camera Self-Calibration for Virtual Environments». En: *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments* 14.4 (ago. de 2005).
- [41] R. Tsai. «A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses ». En: *IEEE Int. Journal Robotics and Automation* 3.4 (1987).
- [42] R. Wackrow. «Spatial measurement with consumer grade digital cameras». Tesis doct. Loughborough University, oct. de 2008.
- [43] R. Wackrow y J. H. Chandler. «A convergent image configuration for dem extraction that minimises the systematic effects caused by an inaccurate lens model». En: *The Photogrammetric Record* (mar. de 2008).
- [44] R. Wackrow, J. H. Chandler y P. Bryan. «Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement». En: *Photogrammetric Record* (jun. de 2007).
- [45] K. Wenzel, Mohammed Abdel-Wahab, A. Cefalu y D. Fritsch. *A multi-camera system for efficient point cloud recording in close range applications*. Inf. téc. Germany: University of Stuttgart, dic. de 2011.
- [46] S. Winkelbach, F. M. Wahl y S. Molkenstruck. «Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach». En: *Lecture Notes in Computer Science* (2006).



Especificaciones técnicas del instrumental

A.1. Canon PowerShoot A800©



Figura A.1: Canon PowerShoot A800

Sensor de imagen	
Tipo	CCD tipo 1/2.3
Píxeles efectivos	Aprox. 10 MPx
Tipo de filtro de color	Colores primarios
Procesador de imagen	
Tipo	DIGIC III con tecnología iSAPS
Tipo de filtro de color	Colores primarios
Objetivo	
Longitud focal	6,6 - 21,6 mm (equivalente en 35 mm: 37 - 122 mm)
Zoom	Óptico 3,3x. Digital aprox. 4x (con teleconvertidor digital aprox. 1,4x o 2,3x y zoom de seguridad). Combinado aprox. 13x Luminosidad (apertura máxima) f/3 - f/5,8
Construcción	7 elementos en 6 grupos (1 lente asférica a una capa)
Enfoque	TTL
Distancia mínima de enfoque	1 cm (angular) desde la parte frontal del objetivo en Modo Macro
Sensibilidad ISO	AUTO, 100, 200, 400, 800, 1600
Velocidad obturador	1 – 1/2000 segundos (valor predeterminado de fábrica) 15 – 1/2000 segundos (gama total, varía según el modo de disparo)
Monitor LCD	
Pantalla	TFT de 6.2 cm (2.5"), aprox. 115.000 píxeles
Imagen	
Tamaño de imagen	3648 x 2736, (M1) 2816 x 2112, (M2) 1600 x 1200, (P) 640 x 480, (panorámico) 3648 x 2048
Videos	640 x 480, 30 fps / 30 fps (LP) (M) 320 x 240, 30 fps
Formatos	Compresión JPEG, (compatible con Exif 2.3 [Exif Print])/Regla de diseño para Camera File system, DPOF (Formato de orden de impresión digital) compatible con la versión 1.1 *Posibilidad de formatos RAW usando CHDK
Formato de video	AVI (compresión Motion JPEG)
Tarjeta de memoria	SD, SDHC, SDXC, MMC, MMCplus, HCMMCplus
Fuente de alimentación	
Pilas	2 pilas alcalinas AA o Ni-MH (se suministran las pilas alcalinas)
Duración	Aprox. 300 / 500 capturas - 660 / 720 min. de reproducción
Alimentador de corriente alterna	Opcional, kit de adaptador de CA ACK800. Este kit permite alimentar la cámara conectándola a una toma de corriente doméstica.
Especificaciones Físicas	
Entorno de funcionamiento	De 0 a 40 °C, de 10 a 90 % de humedad
Dimensiones (An x Al x Prof.)	94,3 X 61,6 X 31,2 mm
Peso	Aprox. 186 g (batería/pilas y tarjeta de memoria incluidas)

Cuadro A.1: Canon PowerShoot A800

A.2. Canon EOS 5D Mark II ©



Figura A.2: Canon EOS5D Mark II

Sensor de imagen	
Tipo	36 x 24 mm CMOS
Píxeles efectivos	Aprox. 21,1 M
Filtro de paso bajo	Incorporado/fijo
Procesador de imagen	
Tipo	DIGIC 4
Tipo de filtro de color	Colores primarios
Objetivo	
Longitud focal	Equivalente a 1,0x la longitud focal del objetivo
Objetivos utilizados	85 mm, 50 mm, 35 mm
Enfoque	
Tipo	TTL-CT-SIR con un sensor CMOS
Sistema/puntos AF	AF de 9 puntos (más 6 puntos AF auxiliares)
Rango de funcionamiento AF	EV - 0,5 - 18 (a 20 °C e ISO 100)
Selección de punto AF	Selección automática, selección manual
Enfoque manual	Se selecciona en el objetivo
Control de exposición	
Compensación de la exposición	+/-2 EV en incrementos de 1/2 ó 1/3 de punto (se puede combinar con AEB)
Sensibilidad ISO	Auto (100-3200), 100-6400 (en incrementos de 1/3 de paso o de 1 paso). La sensibilidad ISO puede ampliarse hasta H1: 12800 y H2: 25600
Obturador	
Tipo	Obturador plano focal controlado electrónicamente
Velocidad	30 - 1/8000 seg. (incrementos de 1/3 de punto), Bulb (rango de velocidad del obturador total. La gama disponible varía dependiendo del modo de disparo)
Visor	
Tipo	Pentaprisma
Cobertura (vertical/horizontal)	Aprox. 98 %
Ampliación	Aprox. 0,71x
Área ocular	Aprox. 21 mm (desde el centro de la lente del ocular)
Espejo	Medio espejo de retorno rápido (transmisión: relación de reflexión de 40:60, sin bloqueo del espejo con EF de 600 mm f/4 o más cortos)
Captura	
Espacio de color	sRGB y Adobe RGB
Disparos en serie	Máx. Aprox. 3,9 fps. (la velocidad se mantiene hasta para 78 imágenes (JPEG) (310 con tarjeta UDMA), 13 imágenes (RAW))
Especificaciones físicas	
Materiales del cuerpo	Aleación de magnesio
Entorno de funcionamiento	0 – 40 °C, humedad relativa del 85 % o inferior
Dimensiones (An x Al x F)	152 x 113,5 x 75 mm
Peso (sólo el cuerpo)	Aprox. 810 g

Cuadro A.2: Canon EOS 5D Mark II

A.3. DAVID SLS-1©

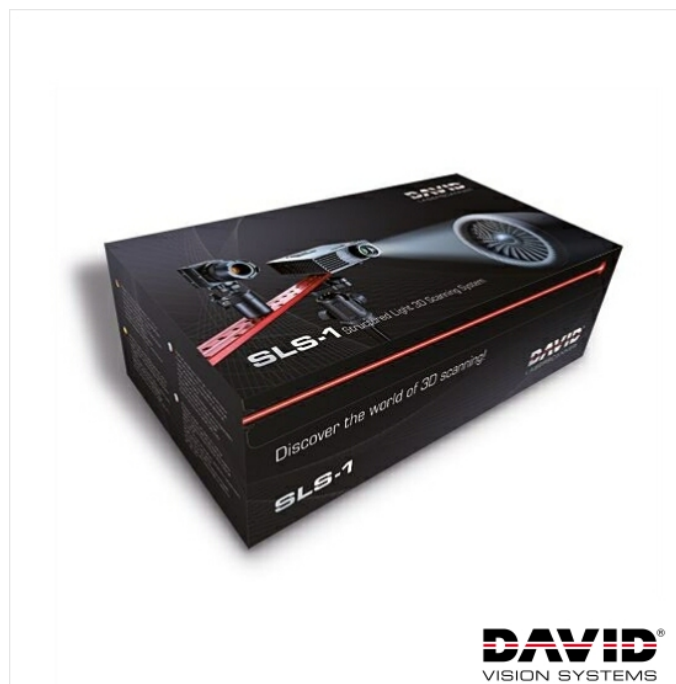


Figura A.3: DAVID SLS-1

Especificaciones técnicas	
Tamaño de escaneo	10-500 mm
Resolución/Precisión	0.1 % del tamaño del objeto (por debajo de 0.05 mm)
Tiempo de escaneo	2-4 segundos por escaneo
Densidad de la malla	Por encima de 1.200.000 vertices por escaneo
Formatos de salida	OBJ, STL, PLY
Peso	10 Kg

Requisitos técnicos	
Sistema operativo	Windows XP, Vista, 7 u 8 - 32 o 64 bits
Puertos USB	2 (mínimo)
Procesador	2 GHz
RAM	1 GB
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce o ATI/AMD Radeon

Cuadro A.3: DAVID SLS-1

A.4. Artec MHT©



Figura A.4: ARTEC MHT

Especificaciones técnicas	
Captura de textura	Sí
Resolución 3D	Hasta 0.05 mm
Precisión de punto 3D	Hasta 0.1 mm
Precisión 3D respecto de la distancia	Hasta 0.15 % sobre 100 cm
Resolución de textura	1.3 mp
Colores	24 bpp
Fuente de luz	Bombilla tipo flash
Distancia de trabajo	0.4 - 1 m
Campo de visión angular	30 x 21°
Relación de fotogramas de video	15 fps
Tiempo de exposición	0.0002 s
Velocidad de obtención de datos	Hasta 288.000 puntos/s
Procesador Multi core	Sí
Dimensiones (Alto x Profundidad x Ancho)	180 x187 x 260 mm
Peso	1.6 kg
Consumo de energía	12 V, 40W
Formatos de salida	OBJ, STL, WRML, ASCII, AOP, CSV, PLY
Capacidad de procesamiento	40.000.000 triángulos
Requisitos técnicos	
Sistema operativo	Windows Vista x64, Windows 7 x64
Puertos USB	2 (mínimo)
Procesador	Intel Core Quad (I5 o I7 recomendado)
RAM	8 GB
Tarjeta gráfica	NVIDIA GeForce 9000

Cuadro A.4: ARTEC MHT



Ídolos. Museo Arqueológico Nacional

En este apéndice se especifican las piezas estudiadas en la prueba realizada en el Museo Arqueológico Nacional. En primer lugar se recoge el contexto histórico y funcionalidad de dichas piezas para posteriormente detallar las características técnicas.

B.1. Ídolos. Contexto histórico y geográfico

Los 'ídolos-placa' están realizados generalmente en pizarra, aunque también se hicieron en otras piedras, como arenisca; presentan siempre silueta trapezoidal que puede aparecer recortada para representar la cabeza y los hombros e incluso los brazos. Las diferencias entre los mismos residen en la decoración, que puede presentarse en una o ambas caras, aunque a veces carece de ella. Los motivos geométricos son incisos (generalmente hileras de triángulos, zig-zags, rombos y bandas horizontales y verticales, ajedrezados) y, en ocasiones, son sustituidos por delineaciones más naturalistas de distintas partes del cuerpo humano (brazos, sexo) e incluso pintura. A veces, estos ídolos presentan delimitado un espacio triangular correspondiente al rostro con indicación de ojos y otros rasgos faciales y, también en ocasiones, una o dos perforaciones en la parte superior.¹

Los 'ídolos-placa' aparecen generalmente en tumbas y poblados de la Extremadura española y el Alentejo portugués del período comprendido entre el IV y el 11 milenio a.c., es decir, entre fines del Neolítico y fines del Calcolítico o Edad del Cobre. También se conocen algunos ejemplares en tumbas de otras zonas de Portugal y la Meseta de similar

¹<https://www.yumpu.com/es/document/view/14446075/idolo-placa-de-granja-de-cespedes-museo-a>
Visitado en Julio 2014

cronología.

Este contexto cronológico y arqueológico recibe la denominación de megalitismo o mundo megalítico, por extensión del nombre de sus tumbas características -los megalitos o monumentos megalíticos-, que con frecuencia son mucho mejor conocidas que los poblados correspondientes.

Otras representaciones antropomorfas más o menos emparentadas con los 'ídolos-placa' son los 'ídolos' sobre falanges o huesos largos de animal y piedra y la denominada 'cerámicas imbólica'-particularmente abundantes en el sur peninsular-, en los que se repiten bien los ojos de aspecto esteliforme y los tatuajes faciales que definen el rostro, y las bandas y otros motivos geométricos para el cuerpo, bien los motivos solares.

Dos de los ídolos estudiados en el presente TFM pertenecen al yacimiento de Granja de Céspedes(Badajoz, Extremadura), descubiertos en 1956 a raíz de unos trabajos de explotación en las inmediaciones de dicha Granja.

Este yacimiento se compone de más de veinte ejemplares de ídolos-placa, varios cuchillos grandes de sílex, una alabarda del mismo material y algunos objetos más.

B.2. Ídolo-Placa 1



Figura B.1: Ídolo-Placa 1

Ídolo-Placa 1	
Nº Inventario	1976/44/4
Clasificación Genérica	Objetos de culto
Objeto/Documento	Ídolo
Tipología/Estado	Placa
Materia/Soporte	Pizarra
Técnica	Pulimentado, Incisión, Grabado, Perforación
Descripción	Ídolo placa de forma trapezoidal y sección plana. Decoración de bandas lisas y reticuladas, bandas en zig-zag lisas y reticuladas. Presenta una perforación en el extremo superior.
Datación	3500[ac][ca]-2500[ac][ca] (IV a III milenio a.C.)
Contexto Cultural/Estilo	Neolítico Final - Calcolítico
Áltura	12.7 cm
Grosor	1 cm
Peso	176 g
Lugar de Procedencia	Dolmen de la Vega del Peso, San Vicente de Alcántara(Alburquerque (comarca), Badajoz)

Cuadro B.1: Ídolo-Placa 2

B.3. Ídolo-Placa 2



Figura B.2: Ídolo-Placa 2

Ídolo-Placa 2	
Nº Inventario	1959/53/10
Clasificación Genérica	Objetos de culto
Objeto/Documento	Ídolo
Tipología/Estado	Placa
Materia/Soporte	Pizarra
Técnica	Pulimentado, Incisión, Grabado, Perforación
Descripción	Ídolo placa de forma trapezoidal y sección plana. Decoración de bandas lisas y reticuladas, bandas en zig-zag lisas y reticuladas. Presenta una perforación en el extremo superior.
Datación	3500[ac][ca]-2500[ac][ca] (IV a III milenio a.C.)
Contexto Cultural/Estilo	Neolítico Final - Calcolítico
Áltura	15.3 cm
Grosor	1 cm
Peso	201 g
Lugar de Procedencia	Granja de Céspedes, Badajoz(Extremadura, España)

Cuadro B.2: Ídolo-Placa 2

B.4. Ídolo-Placa 3



Figura B.3: Ídolo-Placa 3

Ídolo-Placa 3	
Nº Inventario	1959/53/13
Clasificación Genérica	Objetos de culto
Objeto/Documento	Ídolo
Tipología/Estado	Placa
Materia/Soporte	Pizarra
Técnica	Pulimentado, Incisión, Grabado, Perforación
Descripción	Ídolo placa de forma trapezoidal y sección plana. Decoración de bandas en zig-zag lisas y reticuladas. Presenta dos perforaciones en el extremo superior.
Datación	3500[ac][ca]-2500[ac][ca] (IV a III milenio a.C.)
Contexto Cultural/Estilo	Neolítico Final - Calcolítico
Áltura	13.2 cm
Grosor	1 cm
Peso	155 g
Lugar de Procedencia	Granja de Céspedes, Badajoz(Extremadura, España)

Cuadro B.3: Ídolo-Placa 3

B.5. Ídolo-Hueso



Figura B.4: Ídolo-Hueso

Ídolo-Hueso	
Nº Inventario	76-1-ALMI-CASA30-8
Clasificación Genérica	Objetos de culto
Objeto/Documento	Ídolo
Materia/Soporte	Hueso
Técnica	Abrasión, Aserrado, Grabado
Datación	3500[ac][ca]-2500[ac][ca] (IV a III milenio a.C.)
Contexto Cultural/Estilo	Neolítico Final - Calcolítico
Áltura	16,70 cm
Anchura	7,10 cm
Grosor	3,60 cm
Lugar de Procedencia	Almizaraque, Cuevas del Almanzora(Bajo Almanzora (co-marca), Almería)

Cuadro B.4: Ídolo-Hueso



Planificación y presupuesto

En este apéndice se desgranar la planificación de los trabajos para la consecución del presente TFM, así como el presupuesto necesario.

C.1. Planificación

El siguiente Diagrama de Gantt (figura [C.1](#)) muestra una planificación aproximada de los trabajos necesarios para llevar a cabo el presente TFM.

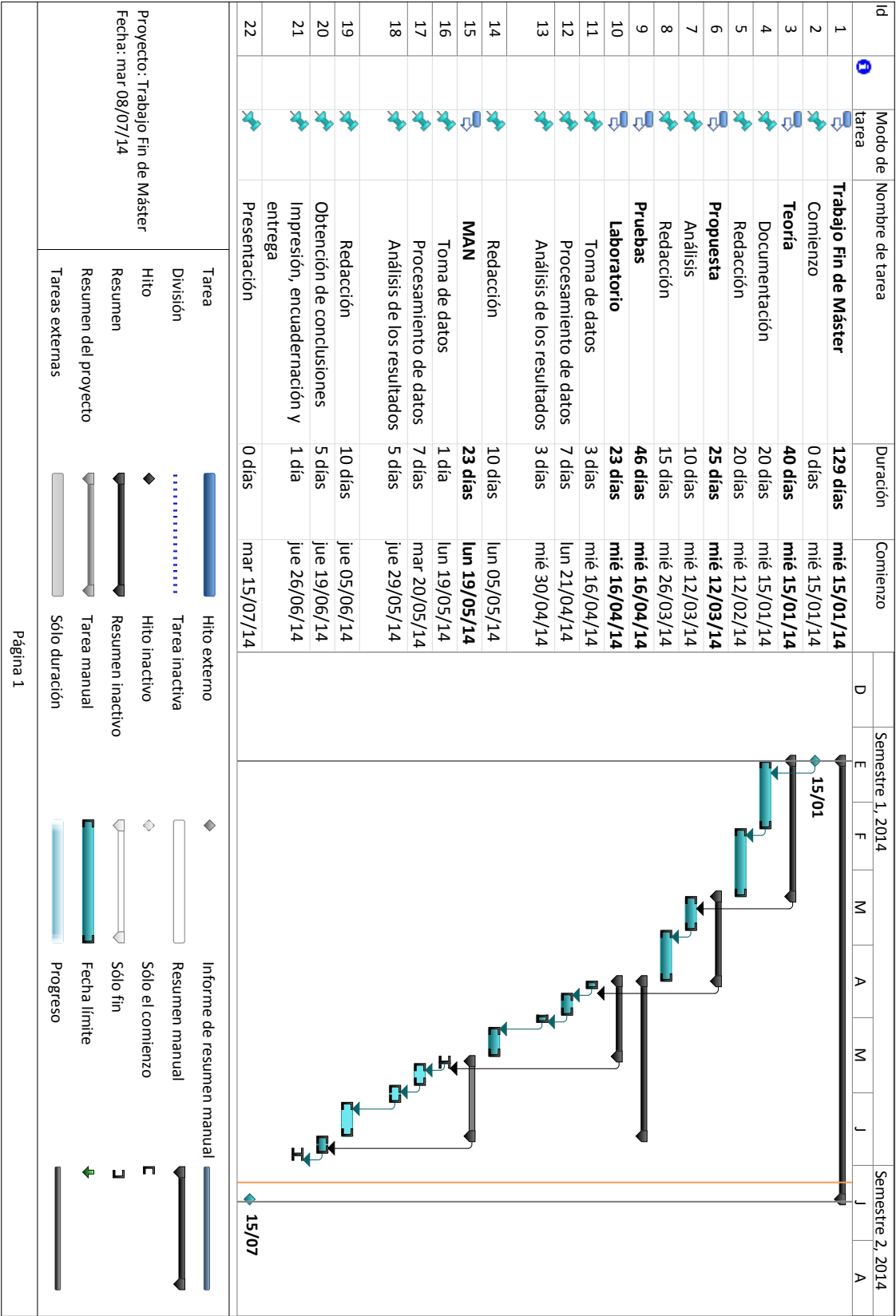


Figura C.1: Diagrama de Gantt

C.2. Presupuesto

En el siguiente presupuesto (tabla C.2) se desgranar los costos de los trabajos necesarios para la consecución del presente TFM. En él se ha tenido en cuenta el emmpleo de un Ing. Téc. en Topografía en todas las taréas con un coste de 18€/hora.

Presupuesto			
<i>Teoría</i>			
<i>Tarea</i>	<i>Días</i>	<i>Precio/Día</i>	<i>Importe</i>
Documentación	20	144€	2.880€
Redacción	20	144€	2.880€
Total			5.760€
<i>Propuesta</i>			
<i>Tarea</i>	<i>Días</i>	<i>Precio/Día</i>	<i>Importe</i>
Documentación	10	144€	1.440€
Redacción	15	144€	2.160€
Total			3.600€
<i>Pruebas</i>			
<i>Tarea</i>	<i>Días</i>	<i>Precio/Día</i>	<i>Importe</i>
Laboratorio	23	144€	3.312€
MAN	23	144€	3.312€
Total			6.624€
<i>Material</i>			
<i>Material</i>			<i>Importe</i>
Alquiler Cámara Canon EOS 5D Mark II			100€
Cámara Canon PowerShoot A800			70€
Trípode			15€
Alquiler Software: Photomodeler Scanner			150€
Alquiler Software: Agisoft Photoscan			100€
Impresión			70€
Encuadernación			30€
Total			7.185€
			16.519€
B.I.(15 %)			2.478€
I.V.A.(21 %)			3.989€
Total			22.986€

Cuadro C.1: Presupuesto